

Neue Strategien zur Analyse von Strahlenbelastungen bei Raumfahrtmissionen

von

Dipl.-Phys. Wolfgang Mai

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roger Förstner
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Günther Dollinger

Die Dissertation wurde am 24. September 2014 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 13. Februar 2015 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 9. März 2015 statt.

Kurzfassung

Das übergeordnete Ziel der Arbeit war es, den Prozess der Strahlungsanalyse von Raumfahrtssystemen sowohl effizienter als auch zuverlässiger zu machen. Dazu wurden ausschließlich Computersimulationen durchgeführt. Hauptwerkzeug war dabei zuvorderst das Programm GRAS, das den Strahlungstransport mit dem Monte-Carlo-Verfahren numerisch berechnet und die Plattform Geant4 des CERN nutzt. Ebenfalls genutzt wurde das Programm SSAT, das nach dem weit verbreiteten Prinzip der Sektoranalyse arbeitet. Dieses hat sich in einigen Studien als ungenau erwiesen, weshalb hier die Ursachen dafür ergründet und Methoden zur Erlangung besserer Ergebnisse entwickelt wurden.

Als Ursache für die teilweise erheblich von den Monte-Carlo-Ergebnissen abweichenden Sektoranalysewerte konnten mehrere Mechanismen identifiziert werden. Als besonders gravierend stellten sich die für Sektoranalysen oft genutzten Werte des gängigen Programms zur Erzeugung von Tiefendosiskurven SHIELDOSE dar, die für Elektronen teils erheblich über jenen, die mit GRAS/Geant4 berechnet wurden, liegen. Aber auch andere Effekte, die im Wesentlichen auf der Ausdehnung des Targets oder der Vernachlässigung gestreuter Elektronen, beruhen, führen zu Abweichungen. Erkennt man die jeweils vorliegende Problematik, kann mit den hier vorgestellten Methoden zur Detailanalyse die Abweichung deutlich reduziert werden. Somit ergibt sich weiterhin die Möglichkeit der Verwendung der Sektoranalysemethode, die gegenüber dem Monte-Carlo-Verfahren den wichtigen Vorteil hat, einfach anwendbar und schnell ausführbar zu sein.

Begutachtet wurden auch verschiedene Abschirmungssysteme, wobei insbesondere masseoptimierte Kombinationen von Materialschichten zu namhaften Einsparungen von Masse führen können. Das Potenzial ist hier vor allem bei elektronendominierten Orbits wie dem MEO sehr hoch. Zusätzliche Massensparnis kann außerdem durch die Berücksichtigung der Wabenkerne von Satellitenstrukturpaneelen erreicht werden. Deren abschirmende Wirkung wurde für Protonen- und Elektronenspektren analysiert und eine Formel für die äquivalent abschirmende Massenbelegung einer Platte erstellt.

Schlussendlich ergab die Anwendung der vorgestellten Strategien auf den konkreten Fall eines Instruments für die Raumsonde JUICE, dass deutliche Einsparungen in Höhe von 5,5% der gesamten Instrumentenmasse möglich sind.

Abstract

The major goal of this thesis was to improve the process of radiation analysis of space systems in terms of efficiency and reliability. Therefore computer simulations were used. The main tool was thereby GRAS (Geant4 Radiation Analysis for Space), which calculates the radiation transport with Monte-Carlo methods numerical and uses the tool kit Geant4 of the CERN. Also utilized was the tool SSAT, which works with the widely-used sector analysis method. Some studies already showed the inaccuracy of this method for which reason the causes were investigated and new techniques for higher reliable results were developed.

As cause for the partly extreme deviation of sector analysis results from Monte-Carlo results different mechanisms could be identified. It showed that serious differences to GRAS/ Geant4 originate in the electron values of the commonly used program for dose depth curve creation SHIELDOSE. Other effects which could lead to high deviations result in the dimension of the target or the negligence of scattered electrons. If the individual difficulty of a target position is recognized, one is able to reduce the deviation with the here proposed methods significant. Thus it is possible to further use the sector analysis method which has the important favor to be easy applicable and quick executable.

Also different shielding systems were investigated, where especially mass optimized combinations of material layers could lead to considerable mass savings. It showed that the potential for this purpose is particularly high for electron dominated orbits like the MEO. Additional mass savings could furthermore be obtained by the consideration of honeycomb cores of satellite structure panels. The shielding effect of these was analyzed for proton and electron spectra and a formula for the area density of an equivalent shielding plate was derived.

Finally the application of the presented strategies on a practical case of an instrument on the Jupiter space probe JUICE showed, that noteworthy mass savings in the region of 5,5% of the instrument mass are possible.

Danksagung

Mein erster Dank soll meiner Familie gelten: Meinen Eltern, die mich erzeugten und erzogen, die mich hegten und pflegten und mir alle Möglichkeiten gaben, meinen Weg zu gehen und meiner lieben Frau Erika, die mich immer durch alle Wellentäler hindurch unterstützt hat und mir Liebe, Rückhalt und Geborgenheit gibt.

An erster Stelle aus dem beruflichen Personenkreis muss Prof. Dr. Roger Förstner genannt werden, der es mir ermöglicht hat, meine Arbeit an seinem Institut für Raumfahrttechnik an Universität der Bundeswehr in München zu schreiben. Als Betreuer stand er mir stets engagiert und kompetent zur Seite, leitete an wo es nötig und ließ Freiheit wo dies möglich war.

Als weiterer großer Unterstützer meiner Forschungstätigkeit soll Dipl.-Ing. Wolfgang Keil hervorgehoben werden, der mir mit seiner langjährigen Erfahrung als Experte für den Einfluss des Weltraumwetters (u.a. EADS) in allen Lagen mit Rat und Tat zur Seite stand und mittlerweile ein Freund geworden ist.

Ein besonderer Dank gebührt den Informatikern des Instituts "Technik Autonomer Systeme" (LRT 8) der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik für die ebenso freundliche wie sachkundige Unterstützung bei informationstechnischen Problemen, wobei insbesondere Dipl.-Inf. André Müller hier zu hervorzuheben ist.

Danken möchte ich außerdem Prof. Dr. Günther Dollinger, der sich bereit erklärt hat, die Zweitkorrektur meiner Arbeit zu übernehmen.

Ein letzter Dank geht an alle Kollegen und Mitarbeiter des Raumfahrtinstituts, die immer für eine gute Atmosphäre gesorgt haben und mit denen es stets fruchtbare Diskussionen und ein gedeihliches Miteinander gab. Es war eine schöne Zeit mit Euch am Institut und ich werde mich immer gerne daran zurückerinnern.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt	4
2.1	Kosmische Strahlung	4
2.1.1	Solare Teilchen	4
2.1.2	Galaktische kosmische Strahlung	5
2.2	Strahlungsumgebungen bei Raumfahrtmissionen	7
2.2.1	Strahlungsgürtel um Planeten mit Magnetfeld.....	7
2.2.2	Interplanetarer Raum.....	7
2.2.3	Planeten ohne Magnetfeld.....	7
2.2.4	Strahlung aus künstlichen Quellen.....	8
2.3	Modelle zur Bestimmung der Teilchenflüsse	8
2.3.1	Strahlungsfeldgrößen	8
2.3.2	Solare Teilchen aus SPE	9
2.3.3	Galaktische kosmische Strahlung	9
2.3.4	Van-Allen-Gürtel	9
2.3.5	Planeten.....	11
2.4	Auswirkungen kosmischer Strahlung auf die Raumfahrt	12
2.4.1	Wechselwirkungen ionisierender Teilchen mit Materie	12
2.4.2	Auswirkungen auf Raumfahrtsysteme	15
2.5	Methoden und Programme zur Berechnung der Dosisbelastungen	19
2.5.1	Sektoranalyse mit Tiefendosiskurven	19
2.5.2	Analyse mittels Monte-Carlo-Simulation	21
3	Abschirmstrategien gegen kosmische Strahlung bei Raumfahrtsystemen	23
3.1	Aktive Abschirmungssysteme.....	23
3.1.1	Abschirmung durch elektrostatische Felder.....	23
3.1.2	Plasmaabschirmung	23
3.1.3	Abschirmung durch Magnetfelder	24
3.2	Passive Abschirmungen	24
3.2.1	Anforderungen an passive Abschirmungen in der Raumfahrt.....	24
3.2.2	Masseoptimierte Abschirmungen	24
3.2.3	Methoden zur Optimierung.....	27

4 Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten.....	30
4.1 Wabenkern-Sandwichplatten	30
4.2 Das untersuchte Sandwichmodell	30
4.3 Versuchsanordnung der Simulation	32
4.3.1 Vergleichskonfigurationen.....	32
4.3.2 Testspektren	33
4.3.3 Konfiguration von GRAS	35
4.3.4 Winkelauswahl zur Untersuchung der Winkelabhängigkeit.....	35
4.4 Ergebnisse	37
4.4.1 Dosis der drei Konfigurationen.....	37
4.4.2 Fluenzen hinter den Anordnungen.....	40
4.4.3 Der Beitrag einzelner Winkel	44
4.4.4 Analyse der Weglänge der Teilchen durch die Wabenstruktur	46
4.4.5 Sektoranalyse der Versuchsanordnung.....	46
4.5 Wabensandwichstrukturen in dreidimensionaler Betrachtung.....	47
4.6 Bewertung der Ergebnisse.....	48
4.7 Fazit und Empfehlung.....	49
5 Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen	51
5.1 Abweichungen bei berechneten Dosen durch unterschiedliche Verfahren.....	51
5.2 Versuchsanordnung der Simulationen	51
5.2.1 Targets.....	52
5.2.2 Einfache Körper	52
5.2.3 Satellitenmodell mit 10 Volumina verschiedener Komplexität.....	53
5.2.4 Satellitenmodell mit 100 Volumina verschiedener Komplexität.....	54
5.2.5 Satellitenmodell mit maximaler Komplexität	55
5.2.6 Das verwendete Testspektrum	56
5.2.7 Konfiguration der Simulationsprogramme	56
5.3 Ergebnisse bei Verwendung von SHIELDDOSE.....	57
5.3.1 Die Tiefendosiskurve von SHIELDDOSE	57
5.3.2 Vergleich von GRAS mit SSAT in Verbindung mit SHIELDDOSE.....	58
5.3.3 Mögliche Ursachen der Abweichung.....	61
5.4 Ergebnisse bei Verwendung einer GRAS-Tiefendosiskurve.....	62
5.4.1 Die GRAS-Tiefendosiskurve	62

5.4.2	Vergleich von GRAS mit SSAT in Verbindung mit der GRAS-Tiefendosiskurve.....	63
5.4.3	Einfluss der Gesamtkomplexität auf die Abweichung.....	72
5.4.4	Analyse der Ursachen für Abweichungen	74
5.5	Korrektur der stark abweichenden Ergebnisse des komplexen Satellitenmodells durch Detailanalyse.....	78
5.5.1	Bauteil 1	78
5.5.2	Bauteil 2	82
5.5.3	Bauteil 3	85
5.5.4	Bauteil 4	88
5.6	Fazit.....	90
6	Erkenntnisse für den Prozess der Strahlungsanalyse in der Praxis	92
6.1	Tiefendosiskurven.....	92
6.1.1	SHIELDOSE.....	92
6.1.2	Geant4.....	92
6.1.3	Fazit.....	93
6.2	Methoden zur Dosisbestimmung	94
6.2.1	Sektoranalyse	94
6.2.2	Monte-Carlo-Simulation	94
6.2.3	Fazit.....	94
6.3	Kosteneinsparpotenzial	95
6.3.1	Einsparpotenziale durch die neuen Methoden	95
6.3.2	Einsparung im konkreten Fall des vorgeschlagenen JARS-Instruments	97
7	Zusammenfassung und Ausblick	103
8	Literaturverzeichnis	105
9	Anhang.....	112
A	Verwendete Testspektren.....	112
B	Ergebnisse der Wabenkernsandwichberechnungen.....	116
C	Ergebnisse der Berechnungen des Vergleichs GRAS - SSAT	119
C 1.	Tabellarische Werte der verwendeten Tiefendosiskurven.....	119
C 2.	Ergebnisse der GRAS-Simulationen.....	122
C 3.	Ergebnisse der SSAT-Simulationen in Verbindung mit SHIELDOSE	138
C 4.	Ergebnisse der SSAT-Simulationen in Verbindung mit der GRAS-Tiefendosiskurve.....	142

D Sonstige Quellen 158

Abkürzungsverzeichnis

CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CME	Coronal Mass Ejection
DD	Displacement Damage
DDEF	Displacement Damage Equivalent Fluence
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
ESA	European Space Agency
GCR	Galactic Cosmic Rays
GDML	Geometry Description Markup Language
Geant	Geometry and Tracking
GEO	Geostationary Orbit
GPS	Global Positioning System
GRAS	Geant4 Radiation Analysis for Space
ISS	International Space Station
JARS	Jupiter Atmospheric Radio Science Experiment
JPL	Jet Propulsion Laboratory
JUICE	Jupiter Icy Moons Explorer
LEO	Low Earth Orbit
LET	Linearer Energietransfer
MBU	Multibit Upset
MEO	Mid Earth Orbit
MEREM	Mars Energetic Radiation Environment Models
MOSFET	Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIEL	Non-Ionising Energy Loss
NIST	National Institute of Standards and Technologies
PE	Polyethylen
RAM	Random Access Memory
RHU	Radioisotope Heater Unit
RTG	Radioisotope Thermoelectric Generator
S/C	Spacecraft
SAA	Südatlantische Anomalie
SEB	Single Event Burnout
SEE	Single Event Effect
SEFI	Single Event Functional Interrupt
SEGR	Single Event Gate Rupture
SEL	Single Event Latch-Up
SEP	Solar Energetic Particle
SES	Single Event Snapback
SET	Single Event Transient
SEU	Single Event Upset
SPE	Solar Particle Event
SPENVIS	Space Environment Information System
SSAT	Sector Shielding Analysis Tool
TID	Total Ionising Dose
TNID	Total Non-Ionising Dose
USO	Ultrastabiler Oszillator

Symbolverzeichnis

λ	Wellenlänge
λ_C	Compton-Wellenlänge
λ_n	Mittlere freie Neutronenweglänge
$^\circ$	Grad
A	Fläche
A	Atomgewicht
a, b	Parameter
AE	Astronomische Einheit
Al eq.	Aluminiumäquivalent
c	Vakuumllichtgeschwindigkeit
cm	Zentimeter
D	Energiedosis
d	Massenbelegung
dE/dx	Bremsvermögen
D_G	Grenzdosis
D_H	Hilfsdosis
D_M	Dosis am Mittelpunkt
D_{pol}	Polarisationskorrekturterm
D_R	Randdosis
D_S	Sektordosis
E	Energie
e	Elementarladung
E_e	Kinetische Elektronenenergie
E_p	Kinetische Protonenenergie
eV	Elektronenvolt
E_γ	Photonenenergie
f	Frequenz
GeV	Gigaelektronenvolt
GeV/n	Gigaelektronenvolt pro Nukleon
GV	Gigavolt
Gy	Gray
h	Plancksches Wirkungsquantum
H	Äquivalentdosis
I	Intensität
I_{eff}	Effektives Ionisationspotential
keV	Kiloelektronenvolt
L	Schalenparameter
LET	Linearer Energietransfer
m	Meter
m_e	Elektronenmasse
MeV	Megaelektronenvolt
mm	Millimeter
MV	Megavolt
N	Teilchenzahl
\dot{N}	Teilchenfluss
N_A	Avogadro-Konstante
n_{Waben}	Wabenanzahl
Q	Qualitätsfaktor

krad	Kilorad
r	Abstand/ Radius
R	Reichweite
rad	Radiation absorbed dose
s	Sekunde
s	Abstand
s_G	Grenzabstand
sr	Steradian
Sv	Sievert
t	Zeit
v	Geschwindigkeit
V	Volumen
V_S	Sektorvolumen
W_A	Austrittsarbeit
X_0	Strahlungslänge
z	Ladungszahl des Projektils
Z	Kernladungszahl
β	Quotient aus Geschwindigkeit v und Vakuumlichtgeschwindigkeit c
θ	Einfallswinkel
μ	Linearer Schwächungskoeffizient
μ_M	Massenschwächungskoeffizient
μm	Mikrometer
π	Kreiszahl Pi
ρ	Dichte
Φ	Teilchenfluenz
φ	Teilchenflussdichte
φ_E	Differenzielle Teilchenflussdichte bzgl. der Energie
φ_S	Streuwinkel
Ω	Raumwinkel

1 Einleitung

Als am 3. Oktober 1942 mit dem ersten erfolgreichen Start der deutschen Großrakete Aggregat 4 das Zeitalter der modernen Raumfahrt begann, waren die Auswirkungen der kosmischen Strahlung auf Raumflüge noch kein Thema. Die kosmische Strahlung war durch Viktor Hess zwar schon 1912 nach Ionisationsmessungen auf Ballonfahrten als sogenannte „Höhenstrahlung“ entdeckt worden [1], aber die komplexen Zusammenhänge ihrer Herkunft und Verteilung lagen noch im Dunkeln. Zudem waren die Systeme in den Anfangsjahren robust und verweilten nur für vergleichsweise kurze Zeiträume im Bereich erhöhter Strahlenbelastung.

Einen wichtigen Schritt zum Verständnis der direkten Erdumgebung stellte die Entdeckung der durch das Erdmagnetfeld hervorgerufenen Strahlungsgürtel durch James Van Allen und seine Mitarbeiter dar. Dies gelang mit einem Geiger-Müller-Zählrohr, das zur Nutzlast des ersten, amerikanischen Satelliten Explorer 1 gehörte [2]. Die Entdeckung und weitere Erforschung dieser Tori aus magnetisch eingefangenen Protonen und Elektronen markierte gleichzeitig den Beginn der ausführlichen Erforschung des Einflusses von energetischer Teilchenstrahlung auf die Raumfahrt.

Als wichtiger Einflussfaktor des Weltraumwetters wurde in dieser Zeit auch die Sonne identifiziert. Biermann postulierte so nach Untersuchungen an Kometenschweifen 1951 den Sonnenwind [3]. Dieser konnte durch die sowjetische Sonde Lunik 1 im Jahr 1959 bestätigt werden [4]. Sonneneruptionen, also Flares und koronale Massenauswürfe, waren schon im 19. Jahrhundert bekannt, aber die heutige Erkenntnis der damit verbundenen intensiven Teilchenflüsse und die damit einhergehende Gefährlichkeit für die Raumfahrt wurden erst später unter anderem durch Explorer 12 aufgedeckt [5].

Dieses Umfeld hochenergetischer, ionisierender Strahlung birgt potenziell Gefahr für sensible Systeme, egal ob diese optisch, elektronisch oder biologisch sind. Dabei führen verschiedene Schadmechanismen wie Ionisierung, Atomversetzung oder Kernumwandlung zu Effekten, die die Funktionalität und Lebensdauer der Systeme beeinträchtigen. Diese Beeinträchtigungen bzw. Defekte können sofort oder über längere Zeiträume entstehen, je nach Art der Beschädigung. Einen Überblick über die Strahlungsempfindlichkeit von verschiedenen Komponenten bzw. Systemen gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Die Schadensgrenzen durch Strahlungsdosen für verschiedene Materialien (nach [6]).

Material	Schadensgrenze [rad]
Biologische Systeme	$10^1 - 10^2$
Elektronik	$10^2 - 10^6$
Schmierstoffe, hydraulische Fluide	$10^5 - 10^7$
Keramiken, Gläser	$10^6 - 10^8$
Polymere	$10^7 - 10^9$
Strukturmetalle	$10^9 - 10^{11}$

1. Einleitung

Bereits 1962 war der Ausfall von sieben Satelliten durch Strahlenschäden zu beklagen. Ursächlich war eine Strahlendosis, die hundertfach (!) höher war als erwartet und die Solarmodule betraf. Hervorgerufen wurden alle diese Schäden, denen auch der bekannte Kommunikationssatellit Telstar 1 zum Opfer fiel, nicht durch die natürliche Umgebung des erdnahen Weltraums sondern durch den außeratmosphärischen Atombombentest Starfish in 325 km Höhe [7]. Den Ausfall von optischen Instrumenten mussten Pioneer 10 und 11 bei ihrer Passage des inneren Strahlungsgürtels von Jupiter verkraften, nachdem die immense Dosisbelastung diese beschädigt hatte [7]. Auch einzelne Teilchen mit ausreichender Energie können Bauteile mittels Einzelereigniseffekten im schlimmsten Fall irreversibel beschädigen. Dies geschah beim PRARE-Instrument (Precise Range and Range Rate Experiment) auf dem ERS-1 Satelliten (European Remote Sensing). Ein RAM-Bauteil hatte einen destruktiven Latch-Up erlitten und das Gerät konnte nach seinem selbständigen Ausschalten nicht wieder gestartet werden [8].

Diese Schadensfälle zeigen, dass eine sorgfältige Analyse strahlenbedingter Belastungen bei der Planung einer Mission eine wichtige Rolle spielt. Für diese Strahlungsanalyse steht eine Reihe von Computerprogrammen zur Verfügung, die im Wesentlichen alle nach einem von zwei verschiedenen Prinzipien arbeiten. Das eine ist die Sektoranalyse, bei der die Materialdicke vom kritischen Punkt nach allen Richtungen vermessen wird. Über eine Tiefendosiskurve, die die Dosis in Abhängigkeit der Abschirmungsdicke angibt, kann dann ein Dosiswert berechnet werden. Naturgemäß ist dieses Verfahren aus verschiedenen Gründen nicht sehr genau. Wesentlich realistischere Ergebnisse liefert dagegen das andere Verfahren, das mittels Monte-Carlo-Methode den Teilchentransport durch den Satelliten berechnet. Wie die Unterschiede im Einzelnen zustande kommen, ist Teil dieser Arbeit.

Um einen Satelliten einer Strahlungsanalyse unterziehen zu können, muss man diesen modellieren. Dies kann je nach erforderlicher Komplexität des Modells sehr aufwendig sein. Nahezu unmöglich erscheint der Aufwand, die Wandstrukturen, die in der Regel aus Wabenkernsandwichpaneelen bestehen, exakt zu modellieren. Um die Abschirmwirkung dieser Wände trotzdem möglichst exakt wiedergeben zu können, wird diese im Rahmen der Arbeit untersucht.

Ist die Belastung für ein strahlensensibles Bauteil bestimmt und übersteigt dessen Toleranz, müssen Maßnahmen ergriffen werden. Dies kann beispielsweise durch den Ersatz des Bauteils durch ein robusteres, strahlengehärtetes geschehen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, individuelle Abschirmungen aufzubringen. Da je nach Teilchenart und Energieverteilung verschiedene Materialkombinationen sehr unterschiedlichen Schutz bieten, ist es von besonderer Bedeutung, optimale Kombinationen zu finden. Diesen Abschirmstrategien ist ein eigenes Kapitel gewidmet.

1. Einleitung

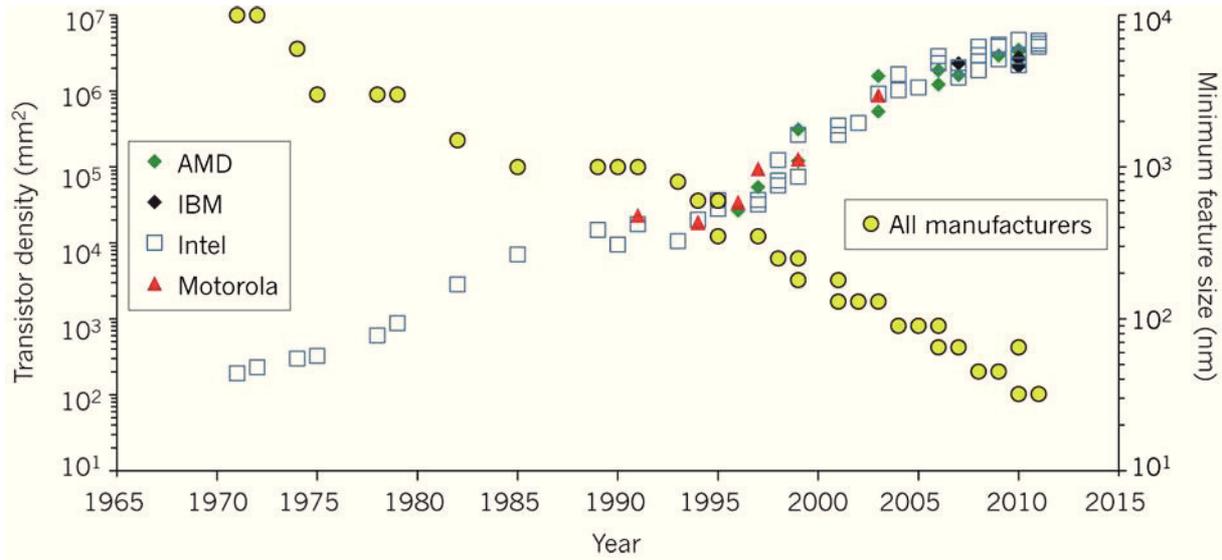


Abbildung 1: Die Transistordichte (linke Skala) von MOSFETs stieg um vier Größenordnungen, während die Gate-Länge (rechte Skala) von 10 μm auf 28 nm schrumpfte. Diese zunehmende Miniaturisierung erhöht die Sensitivität gegenüber hochenergetischer Strahlung (aus [9]).

Zusammenfassend ist die Strahlungsanalyse von fundamentaler Bedeutung für die Raumfahrt und diese wird sich möglicherweise noch steigern. Gerade die weiter zunehmende Komplexität der elektronischen Komponenten durch Miniaturisierung (siehe Abbildung 1) erhöht die Fehlersensitivität. Neue, anspruchsvolle Missionen werden aus Sicht der Strahlenbelastung große Herausforderungen bieten. Dies betrifft anspruchsvollste wissenschaftliche Instrumente wie satellitenbasierte Teleskope oder Konstellationen, die exakte Abstände einhalten müssen. Außerdem werden auch Missionen in Regionen mit extremen Bedingungen wie in den Strahlungsgürteln um Jupiter stattfinden. Und über diesen schon absehbaren Missionen steht die Frage nach der Zukunft der bemannten Raumfahrt. Die oft angedachten Mondbasen und der bemannte Flug zum Mars sind nämlich nach aktuellem Stand der Technik aus Sicht der Strahlenbelastung mehr als fragwürdig [10] und erfordern schließlich neue Methoden und Konzepte.

2 Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

2.1 Kosmische Strahlung

Kosmische Strahlung wird hier wie auch in den meisten Publikationen als Überbegriff für hochenergetische Strahlung, die das Weltall erfüllt, verstanden. Im Gegensatz dazu finden sich auch Veröffentlichungen, in denen damit nur die galaktische Komponente gemeint ist.

Entdeckt wurde die kosmische Strahlung im Jahr 1912 durch Viktor Hess, der auf Ballonfahrten die elektrische Leitfähigkeit maß und dabei mit steigender Höhe eine höhere Ionisierung der Luft feststellte. Daraus schloss er auf eine sogenannte "Höhenstrahlung", die von außerhalb der Erde kommen musste [1]. Im Folgenden werden die Ursprünge der kosmischen Strahlung vorgestellt, während im nächsten Abschnitt 2.2 die konkreten Umgebungen bei Raumfahrtmissionen thematisiert werden.

2.1.1 Solare Teilchen

Der größte Teil der Teilchen im inneren Bereich des Sonnensystems stammt von der Sonne. Diese Teilchen werden nochmal in die Kategorien Sonnenwind und energiereiche solare Teilchen (SEP; "*solar energetic particles*") unterschieden. Der Sonnenwind ist ein ständiger Strom von Teilchen, der als Plasma von der Sonne ausströmt. Er besteht zum Großteil aus Elektronen und Protonen, wobei etwa 4% der Ionen Heliumkerne sind. Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit von durchschnittlich 470 km/s und damit niedrigen Energie der Teilchen (Protonenenergie $E_p \approx 1,1$ keV; Elektronenenergie $E_e \approx 13$ eV; aus [11]) stellt der Sonnenwind aus Sicht der Strahlenbelastung nur für direkt an der Oberfläche liegende Objekte eine potenzielle Gefahr dar.

SEPs treten zusammen mit Sonneneruptionen wie koronalen Massenauswürfen (CME) und solaren Flares auf. Bei diesen sogenannten *solar particle events* (SPE) werden geladene Teilchen durch magnetische Rekonnexionen auf hohe Energien bis zu einigen GeV beschleunigt. Die dabei beschleunigten Teilchen verteilen sich aber nicht gleichmäßig um die Sonne, sondern erreichen nur Bereiche, die mit dem Ausbruchsort durch Magnetfeldlinien verbunden sind. Diese SPE lassen sich nicht mit Sicherheit vorhersagen und können zwischen wenigen Stunden bis zu mehreren Wochen andauern [6]. Für die Eintrittswahrscheinlichkeit existieren daher hauptsächlich statistische Modelle, die auf bisher beobachteten Ereignissen aufbauen. Die Häufigkeit solcher Ereignisse korreliert stark mit dem 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus, der in Abbildung 2 zu sehen ist. So ist erstens die Wahrscheinlichkeit einer großen Sonneneruption zur Zeit um das solare Minimum herum viel niedriger als um das Maximum und zweitens liegen bei Eruptionen im Minimum meistens die Flussdichten um mehrere Größen-

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

ordnungen unter denen des Maximums [12]. Zusammenfassend ist die Belastung durch SEP im Minimum wesentlich geringer als zum Maximum.

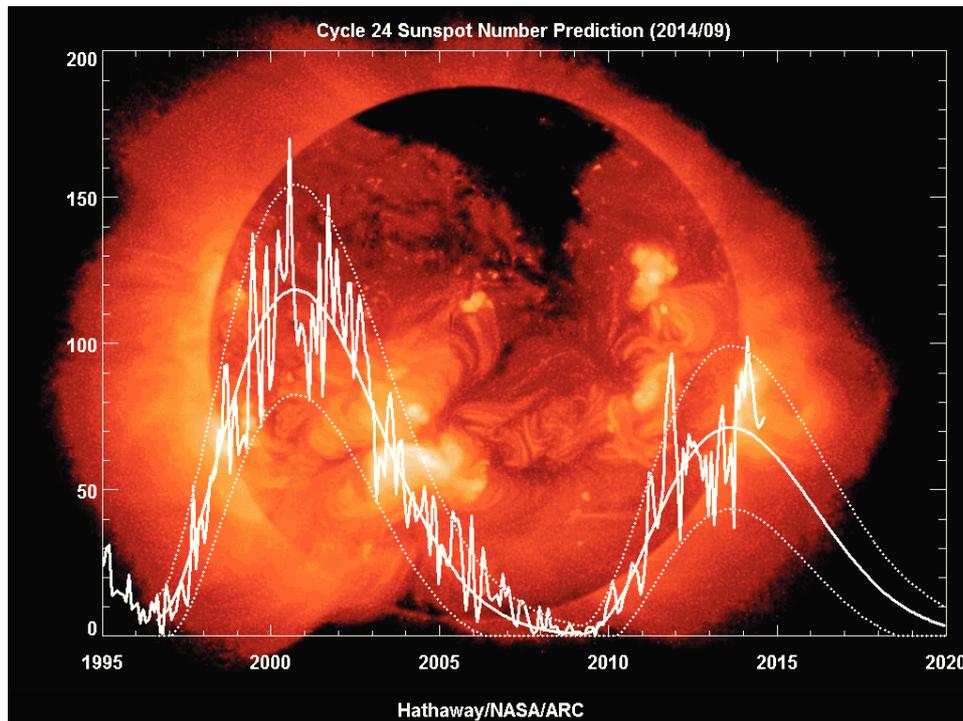


Abbildung 2: Aktueller Verlauf des 24. Sonnenfleckenzyklus mit Vorhersage (Stand: 9/2014) [13].

2.1.2 Galaktische kosmische Strahlung

Die galaktische kosmische Strahlung (GCR) stammt aus Quellen, die außerhalb des Sonnensystems liegen. Sie besteht zu 86% aus Protonen, zu 11% aus He-Kernen, zu 2% aus Elektronen und 1% aus schwereren Kernen bis hin zu Uran [14] und ist außerhalb der Erdmagnetosphäre für alle Energiebereiche isotrop verteilt [15]. Die weiteren Elementhäufigkeiten sind in Abbildung 3 zu sehen. Kerne mit gerader Kernladungs- und Nukleonenzahl sind häufiger, weil sie häufiger in Sternen erbrütet werden. Diese Ionen, die schwerer als Protonen sind, sind zwar verhältnismäßig selten, besitzen aber aufgrund ihrer hohen Energie und Ladung ein erhebliches Zerstörungspotenzial und sind daher im Gegensatz zu den Elektronen und γ -Photonen (0,1% an GCR) nicht vernachlässigbar.

Das Energiespektrum der GCR ist in Abbildung 4 dargestellt. Es folgt einem Potenzgesetz, das bis zum sogenannten "Knie" bei Energien von 10^{14} eV proportional zu $E^{-2,7}$ verläuft, und danach steiler abfällt [14]. Der Energiebereich der GCR beginnt bei etwa 10^6 eV und reicht bis über 10^{20} eV hinaus, wenngleich so hohe Energien extrem selten und damit aus raumfahrttechnischer Sicht irrelevant sind. Die Teilchen mit relativ gesehen niedrigeren Energien bis etwa 10 GeV/n werden von der Sonnenaktivität stark beeinflusst. Sie sind mit dem Sonnenfleckenzyklus antikorreliert, d.h. beim solaren Minimum erreicht die Flussdichte der GCR ein Maximum und umgekehrt.

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

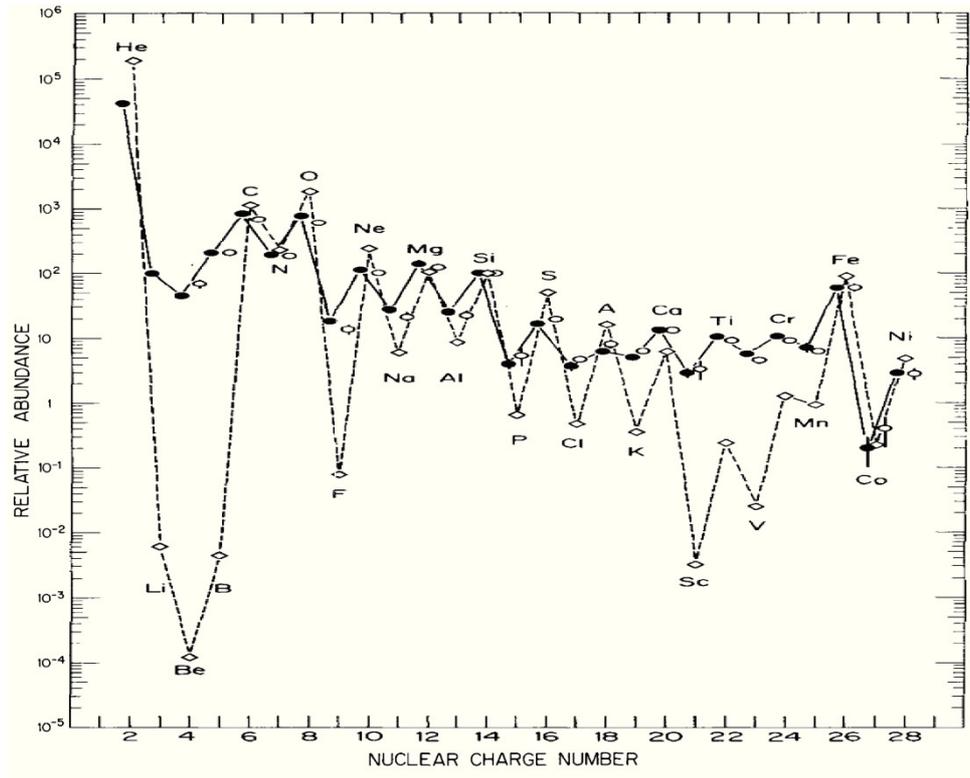


Abbildung 3: Die relative Elementhäufigkeit in der kosmischen Strahlung (durchgezogene Linie) im Vergleich mit der des Sonnensystems (gestrichelte Linie) [16].

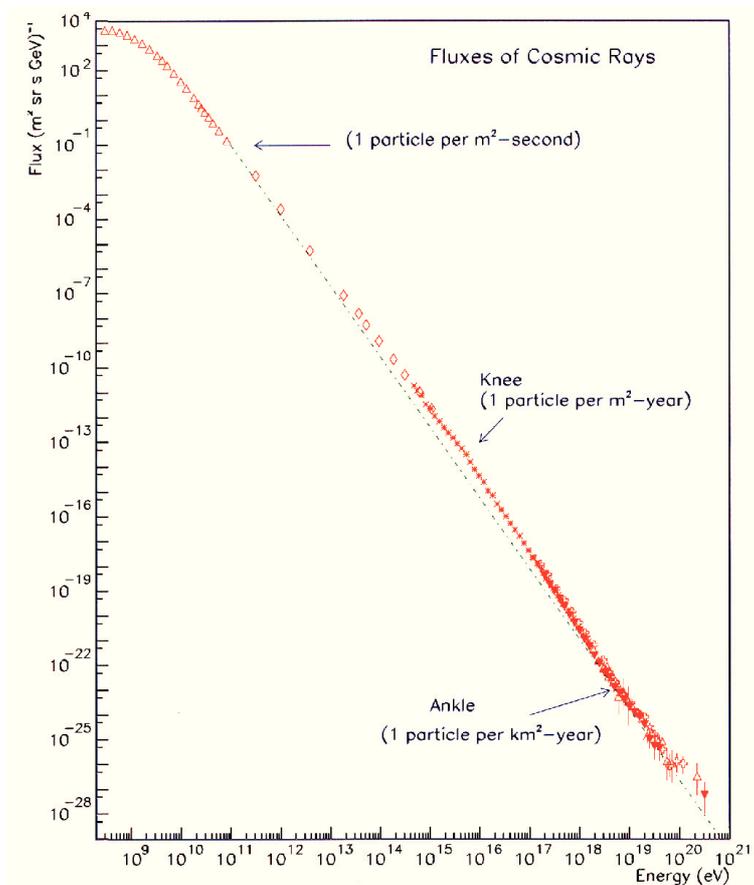


Abbildung 4: Differenzielles Energiespektrum der galaktischen kosmischen Strahlung (aus [17]).

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

Als Erzeugungsmechanismen für Teilchen mit so hohen Energien kommen vermutlich verschiedene Prozesse in Frage. Schockwellen von Supernovae, kosmische Jets und Pulsare sind in der Lage, derart hohe Energien zu erzeugen. Das hochenergetische Ende des Spektrums könnte sogar extragalaktischen Ursprungs sein, denn das Magnetfeld unserer Galaxie kann Teilchen über maximal 10^{19} eV nicht mehr festhalten. Derart hohe Energien erreichen die Teilchen möglicherweise in aktiven galaktischen Kernen [18].

2.2 Strahlungsumgebungen bei Raumfahrtmissionen

Durch die kosmische Primärstrahlung entstehen abhängig von der Beschaffenheit der Umgebung typische Strahlungsumfelder. Einfluss auf die Verteilung, Zusammensetzung und Bewegung der Teilchen nehmen Magnetfelder, Atmosphären oder Oberflächen und erzeugen so die entsprechenden Spektren. Zusätzlich zu diesen natürlichen Quellen können noch künstliche radioaktive Quellen am Raumfahrzeug zur Belastung beitragen.

2.2.1 Strahlungsgürtel um Planeten mit Magnetfeld

Planeten, die ein ausreichend starkes Magnetfeld besitzen, können geladene Teilchen der kosmischen Strahlung einfangen. Diese bewegen sich dann zwischen den Spiegelzonen spiralförmig entlang den Feldlinien auf und ab und bilden so einen dicht bevölkerten Torus um den Planeten [6]. Die Strahlungsgürtel sind aber nicht statisch, sondern variieren sowohl räumlich als auch zeitlich. Eine räumliche Variation ist beispielsweise bei der Erde die sogenannte Südatlantische Anomalie (SAA), die durch den räumlichen Abstand zwischen magnetischen und geographischen Polen zustande kommt [6]. Dadurch erreichen die Teilchen des Gürtels tiefere Regionen als andernorts und können beim Überflug erhebliche zusätzliche Belastungen erzeugen. Zeitlich verändert sich der Gürtel durch veränderte Sonnenaktivität und dadurch ausgelöste geomagnetische Stürme. Neben den bekannten Van-Allen-Strahlungsgürteln um die Erde besitzen auch die Gasriesen wie Jupiter und Saturn solche Gürtel mit enormen Ausmaßen.

Zu den Teilchen des Strahlungsgürtels sind je nach Position auch GCR und SEP präsent. Allerdings werden diese durch das planetare Magnetfeld abgelenkt, so dass die entsprechenden Flussdichten niedriger als im interplanetaren Raum sind. Insbesondere bei niedrigen Orbits geringer Inklination sind die Flussdichten klein und nehmen zu höheren Breitengraden hin zu.

2.2.2 Interplanetarer Raum

Zwischen den Planeten außerhalb des Einflusses von Magnetosphären, Oberflächen und Atmosphären besteht das natürliche Strahlungsumfeld aus Sonnenteilchen und GCR. Dieses variiert zeitlich wie bereits in Abschnitt 2.1.1 bzw. 2.1.2 beschrieben mit dem Sonnenfleckenzyklus. Auch räumlich bestehen große Unterschiede, da die Zahl der SEP im Mittel mit steigendem Sonnenabstand r mit r^{-2} abnimmt.

2.2.3 Planeten ohne Magnetfeld

Planeten und Monde ohne ein ausreichend starkes Magnetfeld sind dem permanenten Bombardement von solaren und galaktischen Teilchen ausgesetzt. Dies führt je nach Boden- und Atmosphärenbeschaffenheit zu markanten Flüssen von Sekundärteilchen wie Neutronen, die nicht vernachlässigt werden dürfen.

2.2.4 Strahlung aus künstlichen Quellen

Zusätzlich zur natürlichen Weltraumstrahlung existieren gelegentlich künstliche radioaktive Quellen am Raumfahrzeug, die bei der Analyse in Betracht gezogen werden müssen. Diese sind meistens Radionuklidbatterien (RTG) oder Radionuklidheizer (RHU), die vor allem bei sonnenfernen Missionen wie Galileo und Cassini eingesetzt werden [15]. Mit ihnen wird mittels des spontanen Kernzerfalls Wärme erzeugt und dann im Falle der RTG in Strom umgewandelt. Als "Brennstoff" kommt meistens der Alphastrahler Pu^{238} zum Einsatz, der eine Halbwertszeit von 87,7 Jahren hat. Denkbare weitere künstliche Quellen können Kernreaktoren oder spezielle wissenschaftliche Instrumente sein.

2.3 Modelle zur Bestimmung der Teilchenflüsse

Für die verschiedenen Strahlungsumfelder bei Raumfahrtmissionen existieren Modelle, um die auftretenden Fluenzen berechnen zu können. Diese basieren meistens auf Messungen von früheren Missionen in Verbindung mit theoretischen Konzepten. Implementiert sind die meisten dieser Modelle im *Space Environment Information System* (SPENVIS) der ESA [19] das unter [20] im Netz abgerufen werden kann und die Berechnung von Teilchenflüssen für individuelle Orbits ermöglicht. Zunächst werden aber die gängigen Größen zur Beschreibung von Strahlungsfeldern erläutert.

2.3.1 Strahlungsfeldgrößen

Unter einem Strahlungsfeld versteht man die räumliche und zeitliche Verteilung von Strahlungsteilchen. Diese haben verschiedene Eigenschaften wie Winkel- oder Energieverteilung, die in der theoretischen Beschreibung erfasst werden können. In der Raumfahrt gängige Größen sind der Fluss, die Flussdichte und die Fluenz. Der Teilchenfluss bezeichnet die Anzahl der Teilchen N , die pro Zeitintervall t im Strahlungsfeld transportiert werden [21]:

$$\dot{N} = \frac{dN}{dt} \quad (1).$$

Die Teilchenfluenz Φ beschreibt die Anzahl der Teilchen N , die ein Flächenelement dA durchströmen [21], also:

$$\Phi = \frac{dN}{dA} \quad (2).$$

Eine häufig verwendete Größe ist die Teilchenflussdichte φ , die den Teilchenfluss durch ein Flächenelement dA angibt:

$$\varphi = \frac{d^2N}{dt \cdot dA} \quad (3).$$

Da die kosmische Strahlung spektral verteilt ist, werden diese Größen in den Modellen mit einer Information über die Energieverteilung angegeben. So sind die Flussdichten/Fluenzen oft differenziell bezüglich der Energie E , d.h. beispielsweise

$$\varphi_E = \frac{d^3N}{dt \cdot dA \cdot dE} \quad (4).$$

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

In einigen Fällen werden Flussdichten bzw. Fluenzen außerdem noch differenziell bezüglich dem Raumwinkel Ω angegeben. Ist die Verteilung dagegen integral, wird die Flussdichte bzw. Fluenz von Teilchen größer einer bestimmten Energie angegeben:

$$\varphi(E' \leq E) = \int_{E'}^{\infty} \varphi_E dE \quad (5).$$

2.3.2 Solare Teilchen aus SPE

Für Sonnenteilchen existieren Modelle, die sich auf zwei Kategorien verteilen: kurzfristige durch eine Sonneneruption hervorgerufene schlimmste anzunehmende Flüsse sowie Langzeitfluenzen, die die durch SPE erzeugten Protonen statistisch aufsummieren. Die schlimmsten Flüsse, die kurzzeitig auftreten können, werden u.a. durch die Modelle CREME96 [22] und das Modell von Xapsos et al. [23] behandelt. Sie basieren auf den von den Satelliten GOES und IMP-8 gemessenen Daten der großen solaren Ausbrüche vom Oktober 1989. Die höchste Fluenz für ein einzelnes Ereignis gibt auch das ESP-Modell [24] an. Zudem existieren noch zwei Modelle für die Flüsse solarer Ionen: CREME96 und das PSYCHIC-Modell (*Prediction of Solar Particle Yields for Characterizing Integrated Circuits*) [25].

Für solare Protonenfluenzen, die über längere Zeiträume auftreten, gibt es das King- [26], das JPL- [27], das Rosenqvist- [28] und das ESP-Modell [24]. Die Schwäche des King-Modells liegt darin, dass nur die Daten eines Sonnenzyklus verwendet wurden und es daher nicht ausreichend repräsentativ ist. Das Rosenqvist-Modell ist eine Weiterentwicklung des JPL-Modells, dem eine über fast drei Sonnenzyklen umfassende Datenbasis zugrunde liegt, das aber wie auch King keinen ausreichend großen Energiebereich abdeckt. In dieser Arbeit wurde daher das ESP-Modell (*Model for Emission of Solar Protons*) verwendet, das auch ECSS-Standard ist [29]. Es beinhaltet Daten aus den kompletten Zyklen 20, 21 und 22, die mit IMP- (Zyklen 20 und 21) bzw. GOES-Satelliten gemessen wurden. Dabei deckt das statistische Modell Energien zwischen 1 und 100 MeV ab, mit extrapolierten Werten sogar bis >300 MeV. Die ausgegebenen Fluenzen beziehen sich auf einen Sonnenabstand von einer AE (außerhalb der Erdmagnetosphäre) und sind isotrop verteilt. Verwendet man diese Modelle in SPENVIS [20], ist es zudem möglich, auch die abschirmende Wirkung des Erdmagnetfeldes zu berücksichtigen.

2.3.3 Galaktische kosmische Strahlung

Zur Berechnung für die Flüsse von GCR gibt es im Wesentlichen drei Modelle: das bereits in Abschnitt 2.3.2 erwähnte CREME96 [22], das Modell von Nymmik et al. [30] und das Modell ISO 15390 [31]. Diese geben die Ionenflüsse der GCR bis zum Uran in Abhängigkeit des Sonnenzyklus an. In SPENVIS [20] können sie genauso wie die solaren Teilchen für Erdorbits mit magnetischer Abschirmung berechnet werden. Das ISO 15390-Modell ist ECSS-Standard [29]. Da die GCR für die Dosisbelastung von Bauteilen in der Regel keine Rolle spielen, werden sie in der weiteren Arbeit nicht berücksichtigt.

2.3.4 Van-Allen-Gürtel

Für die Protonen und Elektronen des Van-Allen-Gürtels gibt es zahlreiche Modelle, die sich jedoch stark in ihrem Geltungsbereich unterscheiden. Für Van-Allen-Protonen stehen in

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

SPENVIS die Modelle AP-8 MIN und AP8 MAX [32] (für Sonnenminimum und -maximum), CRRESPRO [33], SAMPEX/PET [34] und AP-9 [35] zur Verfügung. Ihr jeweiliger Geltungsbereich ist in Tabelle 2 zu sehen. Dabei bezeichnet L den sogenannten Schalenparameter, d.h. den Abstand vom Erdmittelpunkt in der geomagnetischen Äquatorebene zu einer Feldlinie in Erdradien [11].

Tabelle 2: Übersicht über die wesentlichen Protonenmodelle für den Van-Allen-Gürtel (nach [20]).

Modell	Energiebereich [MeV]	Koordinatenbereich
AP-8 MIN	0,1 - 400	$1,14 \leq L \leq 6,6$
AP-8 MAX	0,1 - 400	$1,14 \leq L \leq 6,6$
CRRESPRO	1,1 - 90,4	$1,0 \leq L \leq 5,5$
SAMPEX/PET	18 - 500	$1,14 \leq L \leq 2,0$
AP-9	0,1 - 400	

In dieser Arbeit wurde das Modell AP-8 MAX verwendet. Für dieses Modell, das schon relativ alt ist, sprechen der große Geltungsbereich betreffend Energie und räumliche Ausdehnung (siehe dazu Abbildung 5). Außerdem wird es im ECSS-Standard empfohlen [29]. Das neueste Modell AP-9 stand dagegen zu Beginn der Arbeit noch nicht zur Verfügung.

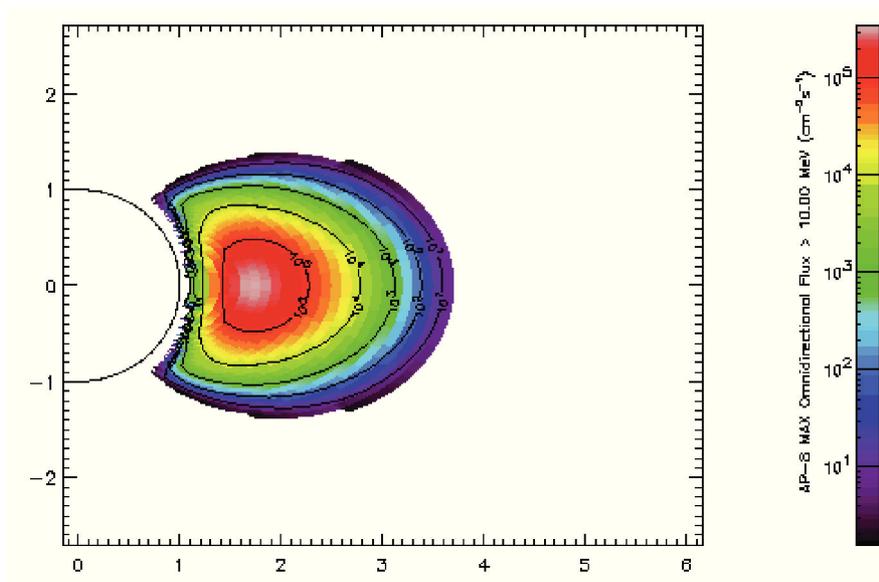


Abbildung 5: Die Verteilung der Protonen mit Energie >10 MeV im Strahlungsgürtel nach dem Modell AP-8 MAX [20].

Für die Elektronen des Van-Allen-Strahlungsgürtels sind in SPENVIS die Modelle AE-8 MIN und AE-8 MAX [36], CRRESELE [37], ESA-SEE1 [38], IGE-2006 [39] basierend auf POLE [40] und AE-9 [35] implementiert. Der Geltungsbereich dieser Modelle ist in Tabelle 3 aufgetragen.

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

Tabelle 3: Übersicht über die wesentlichen Elektronenmodelle für den Van-Allen-Gürtel (nach [20]).

Modell	Energiebereich [MeV]	Koordinatenbereich
AE-8 MIN	0,04 - 7	$1,14 \leq L \leq 12$
AE-8 MAX	0,04 - 7	$1,14 \leq L \leq 12$
CRRESELE	0,5 - 6,6	$2,5 \leq L \leq 6,8$
ESA-SEE1	0,04 - 7	$1,14 \leq L \leq 12$
IGE-2006	0,001 - 5,2	GEO
AE-9	0,04 - 10	

In dieser Arbeit wurde das Modell AE-8 MAX verwendet. Für dieses Modell sprechen vor allem der große Geltungsbereich bezüglich Energie und Koordinaten, der in Abbildung 6 wiedergegeben ist. CRRESELE berücksichtigt niedrige Energien nicht, ESA-SEE1 ist für das solare Minimum konzipiert und IGE-2006 beschränkt sich auf den geostationären Orbit. Bis auf Ausnahmen ist dieses Modell auch das vom ECSS-Standard [29] empfohlene. Das neueste Modell AE-9 stand dagegen zu Beginn der Arbeit noch nicht zur Verfügung.

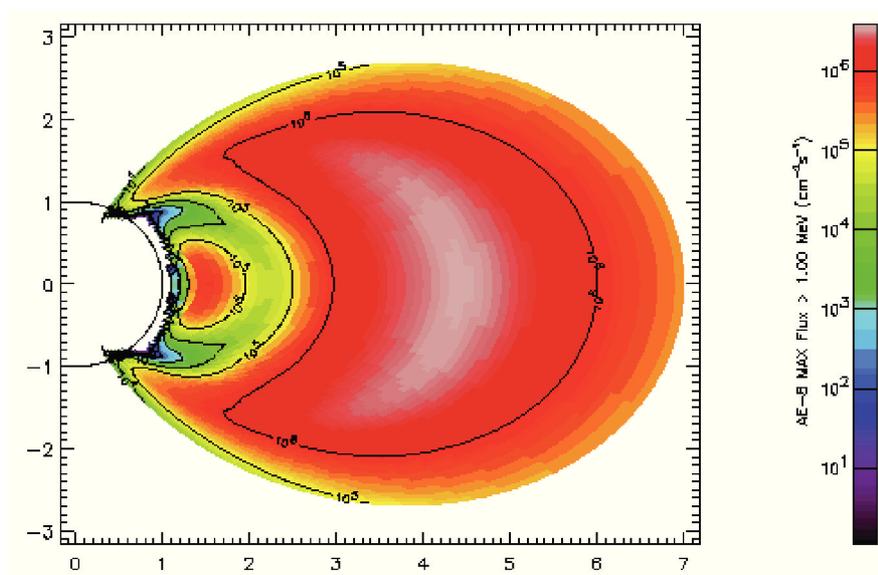


Abbildung 6: Die Verteilung der Elektronen mit Energie >1MeV im Strahlungsgürtel nach dem Modell AE-8 MAX [20].

2.3.5 Planeten

Für einige besser erforschte Planeten, nämlich Mars, Jupiter und Saturn, stehen Strahlungsmodelle zur Verfügung. Für den Mars gibt es die "*Mars Energetic Radiation Environment Models*" (MEREM) [41], die die oberflächennahe Umgebung speziell im Hinblick auf die durch SEP und GCR erzeugte Sekundärstrahlung simulieren. Es können damit sowohl Mars-orbits als auch Orte auf der Oberfläche berechnet werden, wobei die spezifische chemische Bodenbeschaffenheit berücksichtigt werden kann.

Bei den Gasriesen Jupiter und Saturn behandeln die Modelle die jeweiligen Strahlungsgürtel. Für Jupiter gibt es für Protonen und Elektronen das Divine & Garrett-Modell [42], Salammbô-3D [43] und das JOSE-Modell [44], das auch schwere Ionen umfasst. Zudem gibt

es noch ein Update für das Elektronenmodell von Divine & Garrett namens GIRE [45]. In dieser Arbeit werden die mit dem JOSE-Modell berechneten Elektronenflüsse der JUICE-Mission verwendet. Für den Saturn existiert das Modell SATRAD [46], das im Netz frei verfügbar ist.

2.4 Auswirkungen kosmischer Strahlung auf die Raumfahrt

Die kosmische Strahlung in ihren vielfältigen Erscheinungsformen beeinträchtigt die Raumfahrt auf unterschiedliche Weise. Dazu zählen verschiedene Schadmechanismen, die das jeweilige System durch singuläre oder kumulative Wirkung stören. Ursächlich dafür sind die Wechselwirkungen der energiereichen Teilchen mit dem jeweiligen System auf atomarer und molekularer Ebene. Diese werden zunächst beschrieben, worauf die wesentlichen Konzepte zur Beschreibung der Art der Schäden folgen.

2.4.1 Wechselwirkungen ionisierender Teilchen mit Materie

2.4.1.1 Geladene Teilchen

Geladene Teilchen wie Protonen, Ionen und Elektronen stellen den überwiegenden Teil der kosmischen Strahlung und damit praktisch auch die Hauptbelastung für Raumfahrtsysteme dar. Die Wechselwirkungen dieser Teilchen mit dem Targetmaterial sind vielfältig: Streuung an Hüllenelektronen mit Anregung oder Ionisation, inelastische oder elastische Streuung an Kernen, Čerenkov-Strahlung oder Bremsstrahlung können abhängig von Energie und Material auftreten. Der Haupteffekt des Durchgangs von geladenen Teilchen durch ein Medium ist meist die Ionisierung des Absorbermaterials. Dabei entsteht zudem sogenannte Delta-Strahlung, d.h. bei der Ionisierung freigesetzte Elektronen, die ihrerseits wieder ionisierend wirken können. Die Energieübertragung vom Projektil an das durchdrungene Material kann über die pro Wegstrecke dx abgegebene Energie dE/dx , das sogenannte Bremsvermögen, berechnet werden. Für Protonen, Ionen und auch Myonen beschreibt dies die Bethe-Bloch-Formel (nach [47]):

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_A e^4 z^2}{m_e c^2} \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \beta^2 c^2}{I_{eff} (1-\beta^2)} \right) - \beta^2 - D_{pol} \right] \quad (6)$$

Hierbei ist ρ die Dichte des Absorbermaterials, N_A die Avogadro-Konstante, e die Elementarladung, z die Ladungszahl des Projektils, Z die Kernladungszahl und A das Atomgewicht des Targetatoms, m_e die Elektronenmasse, c die Vakuumlichtgeschwindigkeit, β der Quotient aus Geschwindigkeit v und Lichtgeschwindigkeit c , I_{eff} das effektive Ionisationspotenzial des Mediums ($I \approx 10 \cdot Z$ eV) und D_{pol} die Korrektur für die Polarisation des Mediums, die nur bei hohen Energien wichtig ist. Die Bethe-Bloch-Formel gilt nicht für Elektronen, bei Geschwindigkeiten, die nicht wesentlich größer als die der Hüllenelektronen sind und bei extrem relativistischen Teilchen, bei denen die Bremsstrahlung zum Energieverlust beiträgt [48]. Die Bremsstrahlung ist aber für den überwiegenden Anteil an Protonen und Ionen der kosmischen Strahlung komplett zu vernachlässigen.

Für Elektronen (bzw. Positronen) existiert eine ähnliche Formel, die den Ionisationsverlust beschreibt (nach [49]):

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx} \right)_I = \frac{4\pi N_A e^4 z^2}{m_e c^2} \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2}{I_{eff}^2} \cdot \frac{E\beta^2}{1-\beta^2} \right) - \beta^2 \right] \quad (7)$$

Die Nomenklatur ist hier dieselbe wie bei Gleichung (6). Zusätzlich muss bei Elektronen abhängig von Energie und Absorbermaterial der Energieverlust durch die Emission von Bremsstrahlung berücksichtigt werden. Dieser kann durch die folgende Gleichung bestimmt werden (nach [47]):

$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{BS} = \underbrace{\frac{4e^4}{137c^4} \cdot \frac{N_A}{A} Z(Z+1)}_{X_0^{-1}} \cdot \frac{1}{m_0^2} \cdot \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right) \cdot E = \frac{E}{X_0} \quad (8)$$

Die Nomenklatur ist auch hier dieselbe wie in Gleichung (6). Dabei wird X_0 als Strahlungslänge bezeichnet, die den Energieverlust charakterisiert.

Neben der Ionisierung werden durch Impulsübertrag auch Verlagerungen von Gitteratomen des Mediums verursacht. Weitere mögliche Wechselwirkungen sind Kernreaktionen. Dabei können Atomkerne auf verschiedene Weise angeregt, gespalten oder umgewandelt werden. Besonders Kerne mit hoher Kernladungszahl besitzen dafür große Wirkungsquerschnitte und produzieren bei sogenannten Spallationsreaktionen entsprechende Sekundärteilchen wie Neutronen.

Da der Energieverlust der geladenen Teilchen in vielen kleinen Schritten an einer großen Anzahl von Atomen erfolgt, lassen sich trotz der statistischen Natur der Wechselwirkungen Reichweiten mit geringer Unsicherheit angeben [48]. Die CSDA-Reichweite ("*Continuous Slowing Down Approximation*") R berechnet sich nach

$$R = \int_E^0 \frac{dx}{dE} dE \quad (9).$$

Sie beschreibt den Erwartungswert der Pfadlänge eines geladenen Teilchens und nimmt eine kontinuierliche Energieabgabe an. Der Erwartungswert der maximalen Reichweite, also die durchschnittliche Eindringtiefe, wird dagegen durch die projizierte Reichweite ("*Projected Range*") angegeben [50]. Tabellierte Werte zu diesen Reichweiten sowie zu dE/dx finden sich bei [51].

2.4.1.2 Photonen

Photonen im Röntgen- und Gammastrahlungsbereich ($E_\gamma > 0,1$ keV) kommen in der primären kosmischen Strahlung nur in vergleichsweise geringem Maße vor. Aus radiologischer Sicht bedeutsam sind dagegen Bremsstrahlungsphotonen, die in Bereichen hoher Elektronenflüsse (z.B. MEO oder Jupiterumgebung) in großer Zahl erzeugt werden und sehr durchdringend sind. Hochenergetische Photonen können auf fünf verschiedene Arten wechselwirken: Rayleigh-Streuung, Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarerzeugung und durch photonukleare Wechselwirkungen [50]. Da durch die Rayleigh-Streuung keine Energie übertragen und somit auch kein Schaden verursacht wird, soll auf sie nicht eingegangen werden. Photonukleare Ereignisse, d.h. Anregung eines Kerns mit möglicher Emission eines Kernbausteins erfordern

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

Energien über 6 MeV [52]. Sie sind sehr selten und daher vernachlässigbar [50]. Die Haupteffekte sind abhängig von Photonenenergie und Material Photoeffekt, Compton-Effekt und Paarerzeugung, dargestellt in Abbildung 7.

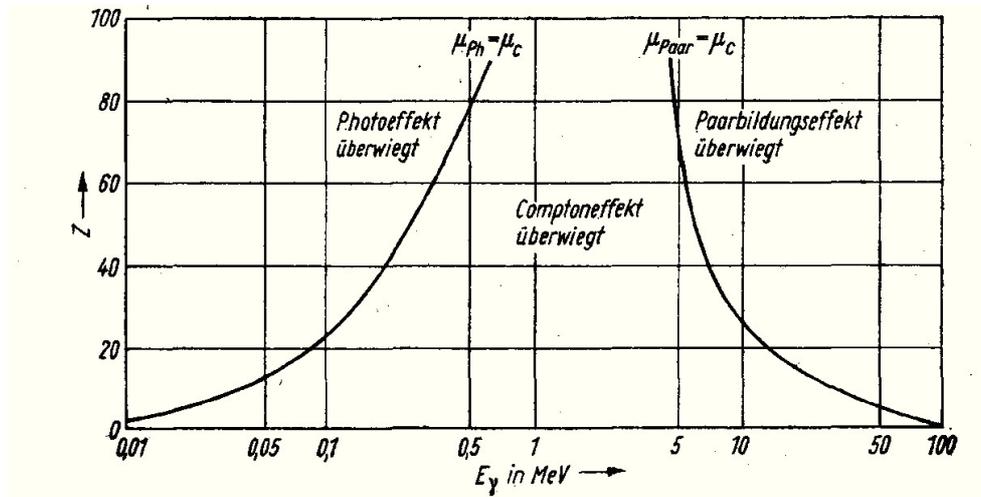


Abbildung 7: Dominierende Photonenwechselwirkungen in Abhängigkeit von Energie und Kernladungszahl des Mediums (aus [53]).

Beim Photoeffekt wird ein Photon vollständig absorbiert und überträgt seine Energie nahezu komplett auf ein Hüllenelektron. Dazu muss das Photon mindestens die Bindungsenergie des Elektrons besitzen. Das freigesetzte Photoelektron hat danach die kinetische Energie, $E_{kin} = hf - W_A$, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum, f die Frequenz des Photons und W_A die materialspezifische Austrittsarbeit ist. Aus Impulserhaltungsgründen muss ein Atomkern an der Reaktion beteiligt sein, weswegen häufig Elektronen der innersten Orbitale betroffen sind [49].

Beim Compton-Effekt handelt es sich um eine elastische Streuung des Photons an einem Elektron (bzw. anderen geladenen Teilchen). Damit einher geht ein Energieübertrag an das Elektron, wodurch sich die Wellenlänge des Gammaquants entsprechend erhöht und seine Energie verringert. Die Wellenlängenänderung $\Delta\lambda$ hängt vom Streuwinkel φ_s des Photons ab und erfolgt gemäß der Gleichung

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \varphi_s) = \lambda_c (1 - \cos \varphi_s) \quad (10).$$

Der Quotient aus dem Planckschem Wirkungsquantum h , Elektronenmasse m_e und Vakuumlichtgeschwindigkeit c ist auch als Compton-Wellenlänge λ_c bekannt.

Der dritte wichtige Effekt der Photonenwechselwirkung ist die Paarerzeugung. Dabei wird ein Photon in Anwesenheit eines Coulomb-Feldes (erforderlich aus Impulserhaltungsgründen) in je ein Elektron und Positron umgewandelt. Die Schwellenenergie dieses Prozesses liegt wegen der Energieerhaltung beim doppelten der Elektronenruheenergie $E_e = m_e c^2$ von 0,511 MeV, also 1,022 MeV. Das Coulomb-Feld kann dabei sowohl vom Kern, als auch von einem Elektron stammen, wobei die Wahrscheinlichkeit für letzteres niedrig ist.

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

Die Abschwächung der Photonenintensität beim Durchgang von Materie durch diese Wechselwirkungen erfolgt exponentiell und kann mit der Gleichung

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\mu x} = I(0) \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} d} \quad (11)$$

berechnet werden. I bezeichnet die Intensität d.h. Photonenflussdichte, x die Schichtdicke und μ den linearen Schwächungskoeffizienten. Dieser wird auch oft als Massenschwächungskoeffizient $\mu_m = \mu/\rho$ angegeben, wobei dann in Formel (11) die Massenbelegung d im Exponenten steht. Der Schwächungskoeffizient ist meistens absolut angegeben und setzt sich additiv aus den Koeffizienten $\mu_{\text{Photoeffekt}}$, $\mu_{\text{Compton-Effekt}}$ und $\mu_{\text{Paarbildung}}$ zusammen. Er ist abhängig vom Material und der Photonenenergie. Tabellierte Werte dieser Koeffizienten finden sich bei [54]. Da die Abschwächung exponentiell erfolgt, können für Photonen keine Reichweiten, sondern nur Halbwertsdicken oder ähnliche Größen angegeben werden.

2.4.1.3 Neutronen

Freie Neutronen kommen in der primären kosmischen Strahlung praktisch nicht vor, weil sie mit einer Halbwertszeit von etwa 10 Minuten in je ein Elektron, Proton und Anti-Elektron-Neutrino zerfallen. Neutronen können aber durch bestimmte Prozesse freigesetzt bzw. erzeugt werden. So kommen Albedo-Neutronen aus der Wechselwirkung kosmischer Teilchen mit Atmosphären und Planetenoberflächen sowie Neutronen aus RTGs, RHUs oder Reaktoren durch Zerfalls- oder Spaltungsprozesse zustande.

Neutronen wechselwirken hauptsächlich mit Atomkernen, da sie nicht wie geladene Teilchen der Coulomb-Abstoßung unterliegen. Die Prozesse umfassen elastische und inelastische Streuungen, Neutroneneinfang, Kernumwandlungen und Kernspaltungen [52]. Dabei entstehen teilweise Sekundärteilchen, die ihrerseits zusätzlich zur Belastung beitragen.

Die Abschwächung der Intensität I von Neutronen erfolgt ähnlich wie bei Photonen exponentiell (nach [55]):

$$I(x) = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda_n}} \quad \text{mit} \quad \lambda_n = \frac{1}{n\sigma} \quad (12)$$

Dabei bezeichnet λ_n die mittlere freie Weglänge, n die Anzahldichte des Mediums und σ den Wirkungsquerschnitt. Die Werte für σ sind abhängig von der Neutronengeschwindigkeit und dem Medium. Tabellierte Werte für σ finden sich u.a. in [55].

2.4.2 Auswirkungen auf Raumfahrtsysteme

2.4.2.1 Energiedosis

Die Größe der Energiedosis, die oft auch als absorbierte Dosis oder TID (*total ionizing dose*) bezeichnet wird, dient als Maß für die kumulative Belastung durch Strahlung. Mit steigender Dosisbelastung häufen sich Schäden wie Ladungssammlung in Isolatorschichten, Aufbrechen atomarer Bindungen und Entstehung von Gitterdefekten, die die Leistungsfähigkeit von Halbleiterbauteilen durch eingeschränkte Ladungsträgermobilität bis hin zum totalen Versagen

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

einschränken [12]. Die Energiedosis gibt die mittlere an ein Massenelement dm bzw. an ein Volumenelement dV der Dichte ρ abgegebene Energie dE an:

$$D = \frac{dE}{dm} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dV} \quad (13)$$

Die SI-Einheit der Dosis ist das Gray (Gy), das einem Joule (J) pro Kilogramm (kg) entspricht. In der Raumfahrt wird aber üblicherweise weiterhin die alte Einheit rad (*radiation absorbed dose*) verwendet. Dabei sind $100 \text{ rad} = 1 \text{ Gy}$. Da die Prozesse der Energieübertragung materialabhängig sind, muss das Bezugsmaterial genannt werden, wenn es nicht aus dem Zusammenhang hervorgeht. In dieser Arbeit beziehen sich alle Dosisangaben, sofern nicht anders angegeben, auf Silizium.

Bei vielen Anwendungen ist nicht nur die absolute Energiedosis zu beachten sondern auch die Zeit, in der diese anfällt. Beschrieben wird dieser Sachverhalt durch die Dosisleistung dD/dt , die die Ableitung der Energiedosis nach der Zeit ist. So kann eine in kurzer Zeit eingebrachte, hohe Energie unter Umständen durch die Temperaturerhöhung im Kristallgitter teilweise ausheilen. Andererseits kann durch eine hohe Dosisleistung beispielsweise eine wissenschaftliche Messung beeinträchtigt werden.

2.4.2.2 Versetzungseffekte (*Displacement Damage*)

Durch Ausschlagen von Atomen aus dem Kristallgitterverbund entstehen Fehlstellen aus Löchern und Zwischengitteratomen. Die Folgen davon sind Veränderungen der Systemeigenschaften. Betroffen sind insbesondere halbleiterbasierte Komponenten wie Solarzellen, Transistoren und Dioden, aber auch optische Komponenten. Dabei reicht für eine Verlagerung in Silizium bereits eine übertragene Energie von etwa 15 eV aus, was nur eine primäre Protonenenergie von 100 eV bzw. Elektronenenergie von 150 keV erfordert [49].

Als Maße zur Beschreibung von Schäden durch Versetzungseffekte werden von der ECSS zwei Größen als Angabe vorgeschrieben [56]: die *displacement damage equivalent fluence* (DDEF) und der *non-ionising energy loss* (NIEL) bzw. der nicht-ionisierende Anteil der Energiedosis (*total non-ionising dose* TNID). Die DDEF gibt an, wie viele auf eine bestimmte Energie normierte Teilchen die der tatsächlichen Fluenz hinsichtlich DD äquivalent sind, erwartet werden. Man kann damit auch die für eine Testdurchführung mit einem monoenergetischen Spektrum benötigte Fluenz berechnen. Diese Energie ist für Protonen meistens 10 MeV und für Elektronen und Neutronen 1 MeV.

Die nicht-ionisierende Dosis ist ähnlich wie die Energiedosis der Quotient aus der Energie, die in ein Massenelement über Atomverlagerungen übertragen wird und der Masse des Elements. Sie kann aus der NIEL-Funktion und der Fluenz berechnet werden. Der NIEL ist in Abhängigkeit der Teilchenenergie in Abbildung 8 für verschiedene Teilchen und Materialien dargestellt.

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

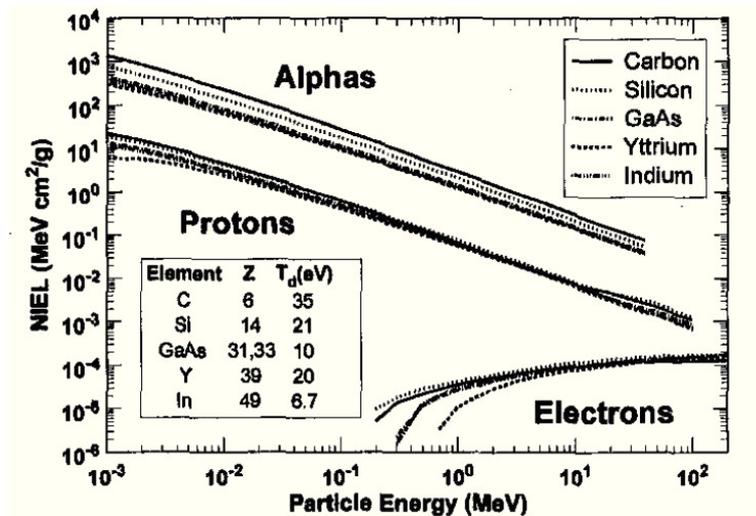


Abbildung 8: Analytisch berechnete NIEL-Werte für verschiedene Teilchen und Targetmaterialien [57].

2.4.2.3 Einzelereigniseffekte (Single Event Effects)

Beeinträchtigungen der Elektronik, die durch einzelne Teilchen verursacht werden heißen *Single Event Effects* (SEE). Diese wurden 1962 zum ersten Mal beschrieben und 1975 erstmals in einem Satellitensystem festgestellt [58]. Hervorgerufen werden können diese SEE durch schwere Ionen mit hoher Energie, wie sie bei SPE und bei den GCR vorkommen. Diese erzeugen auf ihrem Weg durch den Halbleiter eine große Zahl von Elektron-Loch-Paaren, die bei Erreichen bestimmter kritischer Werte zu einem Fehler führen können. SEE können aber auch indirekt durch Protonen ausgelöst werden, indem diese durch Kernreaktionen schwere Rückstoßionen produzieren. In Regionen hoher Protonendichte (z.B. im Van-Allen-Gürtel) ist dieser Prozess sogar dominant [58].

Man unterscheidet bei den SEE meistens zwischen den nicht-destruktiven und destruktiven Ereignissen. Dabei werden in der umfangreichen Literatur zahlreiche Arten unterschieden, von denen die Gängigsten in Tabelle 4 aufgeführt sind.

Tabelle 4: Die wesentlichen Einzelereigniseffekte nach [58]. Die ersten vier sind nicht-destruktiv und die letzten vier (potenziell) destruktiv.

Bezeichnung	Abkürzung	Beschreibung
Upset	SEU	Änderung eines logischen Zustands, Bitflip
Transient	SET	Spannungsspitze
Functional Interrupt	SEFI	Eingeschränkte Funktionalität durch einen Upset
Multibit Upset	MBU	Mehrere Upsets durch ein Ereignis
Latch-Up	SEL	Übergang in Zustand niedrigen Widerstands
Snapback	SES	Rückgekoppelter Zustand hohen Stroms
Gate Rupture	SEGR	Zerstörung des Gates in Power MOSFETs
Burnout	SEB	Durchbrennen des Bauteils durch hohen Strom

Der grundlegende Mechanismus für das Auftreten eines SEEs ist eine hohe Dichte an Elektron-Loch-Paaren, die durch das passierende Ion erzeugt werden. Eine schematische Darstellung dieses Vorgangs mit Erläuterung des Ladungssammlungsvorgangs findet sich in Abbildung 9.

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

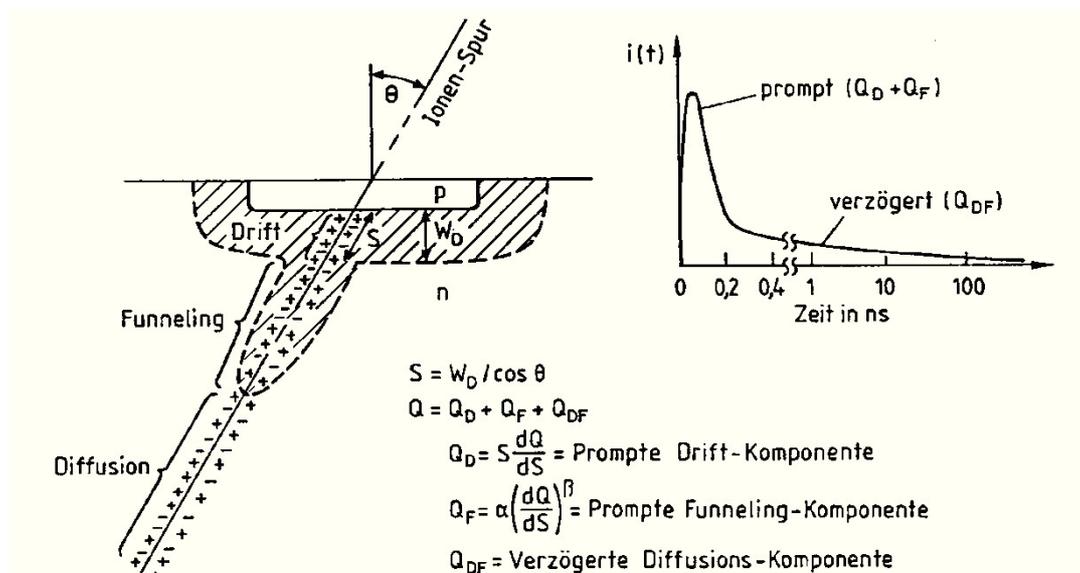


Abbildung 9: Schematische Darstellung zum Durchgang eines Ions durch ein Halbleiterbauteil. Des Weiteren sind die Mechanismen der Ladungssammlung dargestellt [49].

Eine physikalische Größe, die ein direktes Maß für die Zahl der Ionisationen pro Weglänge ist, ist der lineare Energietransfer *LET*. Er gibt an, welche Energiemenge ein ionisierendes Teilchen pro Weglänge abgibt und ist wie folgt definiert:

$$LET = - \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \quad (14).$$

Dabei ist ρ die Dichte des Targetmaterials und dE/dx der Energieverlust durch Ionisation pro Wegstrecke (also das ionisierende Bremsvermögen). Die daraus resultierende Ladungserzeugung hängt dann von der Ionisierungsenergie des Targetmaterials sowie dem Bremsvermögen des Projektils ab. Dieses Bremsvermögen ist nach Gleichung (6) proportional zum Quadrat der Ladungszahl des Ions, weshalb Ionen hoher Ladung besonders gefährlich sind.

Als Schutzmaßnahme ist für jedes kritische Bauteil zu überprüfen wie anfällig dieses für SEU ist. Da man SEE aufgrund der hohen Primärenergie der auslösenden Teilchen nicht durch Abschirmung verhindern kann, ist es wichtig, soweit wie möglich unempfindliche Teile zu verwenden. Sind SEU nicht vermeidbar, kann in der Planungsphase die Häufigkeit, mit der diese auftreten, ermittelt werden. Dazu gibt es für viele häufig verwendete Standardteile LET-Grenzwerte mit SEU-Raten, die in Tests im Beschleuniger oder mit Californium-252-Quellen ermittelt wurden. Alternativ gibt es auch verschiedene Ansätze, um die Sensibilität zu errechnen (z.B. in [58] oder [59]). Die durch SEU ausgelösten Bitfehler können bis zu einem gewissen Grad auch durch Kodierungstechniken korrigiert werden. Um die gefährlichen SEL zu vermeiden, sollten ebenso unempfindliche Bauteile zum Einsatz kommen. Zudem gibt es die Möglichkeit einer Sicherung, die bei einem starken Ansteigen des Stroms das Bauteil abschaltet und neustartet, um eine Zerstörung zu vermeiden.

2.4.2.4 Biologische Auswirkungen

In der bemannten Raumfahrt sind die biologischen Auswirkungen der kosmischen Strahlung von größter Bedeutung. Dabei sind grundsätzlich abhängig von der Dosis sofortige Wirkun-

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

gen von Übelkeit bis hin zum Tod möglich. Bei der in der Raumfahrt üblichen längerfristigen Belastung mit kleineren Dosen sind die Wirkungen dagegen in der Regel stochastisch, d.h. die Eintrittswahrscheinlichkeit der Folgen erhöht sich mit steigender Dosis, aber nicht der Schweregrad [52]. Die Folgen der stochastischen Strahlenwirkung können Zellveränderungen und damit einhergehend Tumorwachstum sowie eine Schädigung des Erbguts sein.

Die ionisierende Strahlung zerstört im Körper Moleküle. Daraus resultieren direkte Schäden an den DNS-Molekülen sowie die Erzeugung von freien Radikalen, die ihrerseits hochreaktiv und damit potenziell zellschädlich sind. Da die Belastung für den menschlichen Körper bei hoher Schadensdichte größer als bei verteiltem Schaden ist, definiert man zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirksamkeit die Äquivalentdosis H [21]:

$$H = Q \cdot D$$

Sie ist das Produkt aus Energiedosis D (siehe Gleichung (13)) und dem Qualitätsfaktor Q . Die Einheit ist das Sievert (Sv), das einem Joule pro Kilogramm entspricht. Der Qualitätsfaktor Q hängt vom unbeschränkten LET (siehe Gleichung (14)) eines Teilchens in Wasser ab und lässt sich gemäß Tabelle 5 bestimmen. Für Photonen und Elektronen gilt daher $Q = 1$

Tabelle 5: Zusammenhang von unbeschränktem LET und dem Qualitätsfaktor [21].

Unbeschränktes LET in Wasser [keV/ μm]	Q(LET)
< 10	1
10 - 100	$0,32 \times \text{LET} - 2,2$
> 100	$300/\text{LET}^{1/2}$

Zur Abschätzung des gesamten Strahlungsrisikos muss man die effektive Dosis berechnen, die sich aus den jeweiligen, entsprechend gewichteten Teildosen für die jeweiligen Körperorgane errechnet. Details dazu finden sich in [21].

2.5 Methoden und Programme zur Berechnung der Dosisbelastungen

Um die verschiedenen Belastungsgrößen berechnen zu können, existiert eine Reihe von Modellen, die in entsprechenden Programmen umgesetzt sind. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Analyse der absorbierten Energiedosen. Deshalb werden hier die zwei grundsätzlichen Methoden zur Analyse erläutert und die jeweils in der Arbeit benutzten Programme vorgestellt.

2.5.1 Sektoranalyse mit Tiefendosiskurven

2.5.1.1 Methode

Die Dosisermittlung an einem beliebigen Punkt einer Anordnung beruht bei der Sektoranalyse auf zwei Schritten. Erstens wird eine Tiefendosiskurve des entsprechenden Strahlungsspektrums benötigt. Sie gibt die absorbierten Energiedosen als Funktion der Abschirmungsdicke an. Das Abschirmungs- und Targetmaterial kann entsprechend dem Anwendungsfall gewählt werden. Üblicherweise wird Aluminium als Abschirmung und Silizium als Targetmaterial verwendet. Auch die geometrische Anordnung von Abschirmung und Target kann dem Anwendungsfall entsprechend variiert werden. Übliche Geometrien sind im zweidimensionalen

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

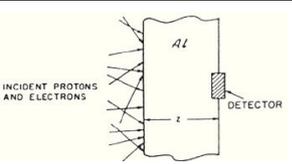
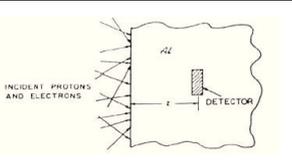
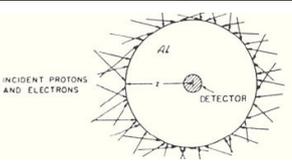
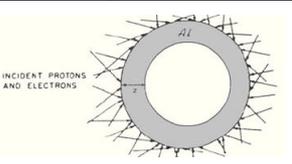
Fall Platten oder für dreidimensionale Anwendungen Kugeln bzw. Kugelschalen (siehe Tabelle 6). Beispiele für solche Kurven sind auf Abbildung 42 und Abbildung 44 zu sehen.

Im zweiten Schritt wird die Abschirmung des interessierenden Punktes analysiert. Dazu wird der Raumwinkel, unter dem die Strahlung einfällt, in Sektoren unterteilt. Für jeden dieser Sektoren wird nun ermittelt, welche Massenbelegung jeweils als Abschirmung zur Verfügung steht. Diese Messung erfolgt mit dem sogenannten Ray-Tracing-Verfahren, d.h. Spurstrahlen ermitteln den vom Messpunkt durch die jeweiligen Materialien des Modells zurückgelegten Weg. Als Ergebnis ergibt sich ein Raster von Abschirmungsdicken für die einzelnen Sektoren, denen zusammen mit der Tiefendosis Kurve die jeweiligen Energiedosen zugewiesen werden können. Die Summe dieser Sektorenteildosen ergibt dann die Gesamtdosis.

2.5.1.2 SHIELDOSE

Bei SHIELDOSE handelt es sich um ein Programm, das für Protonen- und Elektronenspektren Tiefendosis Kurven erstellt. Nach SHIELDOSE [60] und SHIELDOSE-2 [61] liegt mittlerweile die dritte Version SHIELDOSE-2Q [62] vor. Zur Erstellung dieser Kurven greift SHIELDOSE auf tabellierte Werte für monoenergetische Teilchen zurück, die mittels Bremsvermögen- und Reichweitendaten für Protonen bzw. Monte-Carlo-Simulationen (siehe Abschnitt 2.5.2.1) mit dem ETRAN-Code ("Electron Transport") für Elektronen vorberechnet wurden. In der neuesten, erweiterten Version stehen eine Reihe von Abschirmungs- sowie Targetmaterialien zur Verfügung, wobei für die meisten Anwendungen die klassische Anordnung mit Aluminium als Schild und Silizium als Target zum Einsatz kommt. In Tabelle 6 sind die möglichen geometrischen Anordnungen von Abschirmung und Target dargestellt.

Tabelle 6: Verschiedene Anordnungen für Tiefendosisberechnungen mit SHIELDOSE (nach [62]).

Endliche Platte	Halbunendliche Platte	Vollkugel	Kugelschalen
			
Isotrope Quelle über 2π Raumwinkel	Isotrope Quelle über 2π Raumwinkel	Isotrope Quelle über 4π Raumwinkel	Isotrope Quelle über 4π Raumwinkel

Die tabellierten Werte wurden mit monoenergetischen Elektronen und Protonen für Plattenanordnungen berechnet, die das 1,2-fache der CSDA-Reichweite maßen [61]. Dabei wurden δ -Elektronen, Bremsstrahlung, elastische Streuung und Coulomb-Wechselwirkungen berücksichtigt. Die Ergebnisse der sphärischen Anordnungen wurden dagegen durch eine mathematische Konversion erreicht [63]. Die absorbierte Dosis wurde in Aluminium gemessen und für die anderen Detektormaterialien über Absorptionsfaktoren umgerechnet [64]. Als Eingabe bekommt das Programm ein Fluenz bzw. Flussspektrum. Daraus errechnet es dann die jeweiligen Energiedosen bzw. -dosisraten.

2.5.1.3 Sector Shielding Analysis Tool (SSAT)

SSAT ist ein Geant4-basiertes (siehe Abschnitt 2.5.2.2) Programm, das dreidimensionale Sektoranalysen zur Abschirmungsberechnung durchführt [65]. Um die Verteilung der ab-

2. Theoretische Grundlagen der Strahlungsanalyse in der Raumfahrt

schirmenden Materialien an einem Punkt zu bestimmen, wird von dort aus ein Ray-Tracing mit imaginären Teilchen ("Geantinos") durchgeführt. Eine Visualisierung dieses Prozesses ist in Abbildung 10 zu sehen. Die gewünschte Genauigkeit lässt sich dabei über die Anzahl der Intervalle, in die der Raumwinkel eingeteilt wird, und die Anzahl der Spurstrahlen je Segment einstellen. Die Spurstrahlen registrieren beim Durchgang durch das geometrische Modell jeweils den Übergang in ein anderes Volumen. Diese Daten zusammen mit den Maßen des geometrischen Modells ergeben dann die Abschirmung für jeden Sektor und in Summe für den gesamten Satelliten. Erfolgt die optionale Eingabe von Tiefendosisdaten, berechnet SSAT die entsprechende Dosis.

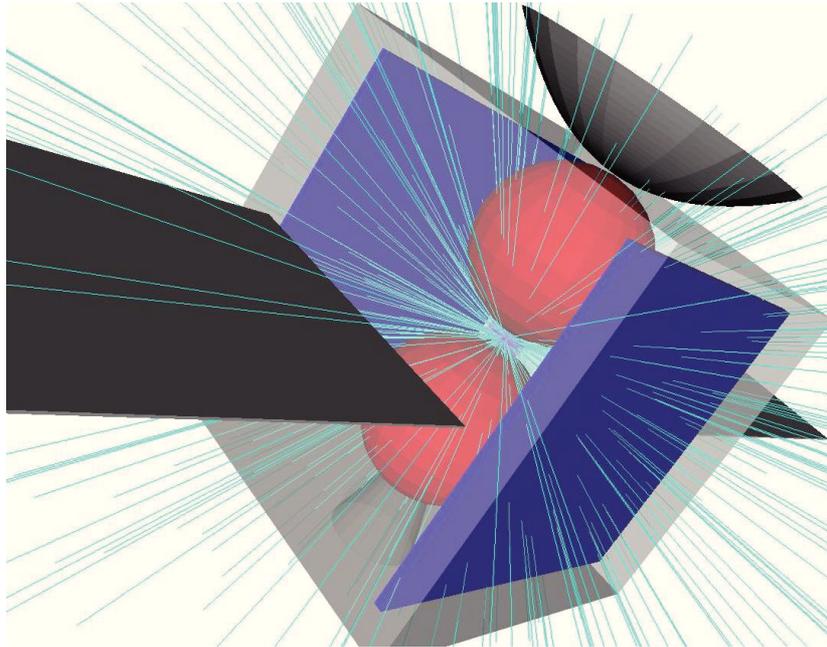


Abbildung 10: Ray-Tracing mit SSAT an einem einfachen Satellitenmodell.

2.5.2 Analyse mittels Monte-Carlo-Simulation

2.5.2.1 Methode

Da es sich sowohl bei der räumlichen und energetischen Verteilung der kosmischen Strahlung als auch beim Strahlungstransport durch den Satelliten um stochastische Prozesse handelt, können Vorhersagen immer nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit getroffen werden. Die Simulation dieser Prozesse erfordert die Erzeugung von Zufallszahlen, die mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten auftreten. Dies liefert die sogenannte Monte-Carlo-Methode.

So können die verschiedenen Prozesse von der Teilcentrajektorie und -energie über die zahlreichen Transport- und Streumechanismen bis zum Unterschreiten einer Schwellenenergie oder der Absorption gemäß den entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen physikalischen Vorgänge simuliert werden. Werden diese zufällig erzeugten Experimente häufig genug durchgeführt, verbessert sich entsprechend die Zuverlässigkeit des Ergebnisses und die statistische Unsicherheit sinkt (und zwar $\sim n^{-1/2}$).

2.5.2.2 *Geant4*

Bei Geant4 ("*Geometry and Tracking*") handelt es sich um einen umfangreichen Werkzeugersatz von Programmen zur Simulation von Teilchendurchgang durch Materie [66]. Es wurde am CERN objektorientiert in C++ entwickelt und ist im Netz frei verfügbar. Durch den enormen Energiebereich, den Geant4 abdeckt, wird es in zahlreichen Fachgebieten wie der Beschleunigerphysik, Astrophysik, Medizin oder im Strahlenschutz eingesetzt.

Die zugrundeliegenden physikalischen Theorien finden sich im "Physics Reference Manual" [67] (hier zitiert für die in der Arbeit benutzte Version). Grob unterteilt berücksichtigt Geant4 elektromagnetische und hadronische (d.h. die starke Kernkraft betreffende) Wechselwirkungen sowie Zerfälle. Diese Wechselwirkungen untergliedern sich abhängig von verschiedenen Parametern wie Energie oder Teilchenart in zahlreiche Mechanismen, die je nach Anwendungsfall Verwendung finden können bzw. müssen.

Für Geant4 wurde eine hohe Übereinstimmung mit realen physikalischen Experimenten nachgewiesen. So wurde bei einer Validierung beispielsweise für die elektromagnetischen Modelle eine gute Korrespondenz mit den Ergebnissen aus der NIST-Datenbank festgestellt [68].

2.5.2.3 *MULASSIS*

Bei der "*Multilayered Shielding Simulation Software*", kurz MULASSIS, handelt es sich um ein Geant4-basiertes Programm, das die Abschirmung von Strahlungsspektren durch Materialschichten berechnen kann [69]. Dafür sind zwei grundsätzliche geometrische Anordnungen ähnlich wie bei SHIELDOSE wählbar: Platten- oder Kugelform. Für diese Formen lassen sich dann Schichtdicken und die zugehörigen Materialien definieren. Analysiert werden kann nach der Bestrahlung durch ein entsprechend eingegebenes Spektrum die Fluenz vor und nach Schichten, der NIEL, die Äquivalent- oder die Energiedosis in einer Schicht oder die Pulshöhenverteilung.

Geeignet ist das Programm vor allem zur Analyse und Optimierung von Abschirmungen, aber auch zur Erstellung von Tiefendosiskurven.

2.5.2.4 *GRAS*

"*Geant4 Radiation Analysis for Space*" (GRAS) ist ein von der ESA entwickeltes, Geant4-basiertes Programm, das die Strahlungsanalyse von komplexen dreidimensionalen Modellen ermöglicht [70]. Die untersuchte Geometrie kann entweder in der MULASSIS-Form (für Schichtungen) oder in verschiedenen Formaten (für 3-D-Modelle) eingegeben werden. In dieser Arbeit wurde das Format GDML ("*Geometry Description Markup Language*") verwendet, mit dem auf XML-Basis die detaillierte Definition von komplexen Körpern möglich ist [71]. Als physikalische Modelle stehen verschiedene Module für elektromagnetische und hadronische Wechselwirkungen sowie Zerfälle zur Verfügung. Analysierbare Größen sind neben verschiedenen Dosisstypen die Fluenz, Pfadlängen, LET und der Ladungsfluss durch definierte Grenzschichten. Die Eingabe der Definitionen und Befehle erfolgt wie auch in MULASSIS über Makro-Dateien.

3 Abschirmstrategien gegen kosmische Strahlung bei Raumfahrtssystemen

Zum Schutz der Nutzlast ist es manchmal notwendig, Maßnahmen zur Reduktion der Strahlenbelastung zu treffen. Neben der Auswahl besonders robuster, sogenannter strahlengehärterter Bauteile oder dem Einbau an besonders geschützten Orten im Satelliten kommen dafür insbesondere Abschirmungen zum Einsatz. Diese bestehen entweder aus entsprechend angebrachten Materialschilden oder aus einem aktiven System, das die Teilchen mit Feldern ablenkt.

3.1 Aktive Abschirmungssysteme

Unter aktiven Abschirmungen versteht man Systeme, die geladene Teilchen mit künstlich erzeugten elektromagnetischen Feldern ablenken. Diese werden für die bemannte interplanetare Raumfahrt vorgeschlagen, da hier die Strahlenbelastungen durch SEP und GCR für die Besatzung deutlich über den zulässigen Grenzwerten liegen und passive Abschirmungen hohe Massenbelegungen erfordern. Da diese aktiven Systeme bisher nur theoretisch erörtert wurden und nicht operativ sind, sollen die grundlegenden Konzepte sowie ihre Machbarkeit im Folgenden nur kurz erläutert werden.

3.1.1 Abschirmung durch elektrostatische Felder

Elektrostatische Abschirmungen arbeiten nach dem Prinzip, dass sich gleichnamige Ladungen abstoßen. Für die technische Umsetzung wurden zwei Konzepte vorgeschlagen [72]: Konzentrischen Schalen um das Raumfahrzeug nach Art eines Kondensators sowie die direkte Aufladung des Raumschiffs durch das Aussenden eines Elektronenstrahls. Beim Betrachten der benötigten Ladungen wird aber deutlich, dass eine technische Umsetzung derzeit völlig unmöglich erscheint. So müsste zur Abwehr von Protonen mit einer kinetischen Energie von 1 GeV die Kondensatorspannung 1 GV betragen. Bei Feldstärken über 2 MV/m kommt es aber zum Überschlag [72], weswegen diese Anordnungen enorme Ausmaße annehmen würden. Die direkte Aufladung auf Potenziale dieser Größenordnung dagegen kann durch die ständige Anwesenheit von Plasma durch den Sonnenwind nicht erreicht werden. Zudem würde diese direkte Aufladung negative Ladungsträger wie Elektronen stark beschleunigen und damit wiederum für zusätzliche Strahlenbelastung sorgen.

3.1.2 Plasmaabschirmung

Auch das Prinzip der Plasmaabschirmung funktioniert durch ein elektrisches Feld, das die Protonen abbremst. Im Gegensatz zu den Konzepten aus Abschnitt 3.1.1 entsteht das Feld hier zwischen dem positiv geladenen torusförmigen Raumschiff und einem Elektronenplasma, das durch ein Magnetfeld erzeugt wird [73]. Technische Probleme bestehen auch hier im Aufladen des Raumfahrzeugs und den möglichen Feldstärken, die enorme Dimensionen von einigen Kilometern erfordern. Zudem ist die Stabilität des Elektronenplasmas über hinreichend

3. Abschirmstrategien gegen kosmische Strahlung bei Raumfahrtssystemen

lange Zeiträume in Frage zu stellen. Praktisch besteht außerdem auch hier das Problem, dass negative Ladungsträger also insbesondere Elektronen durch ihre Beschleunigung im elektrischen Feld das Bemühen der Belastungssenkung konterkarieren.

3.1.3 Abschirmung durch Magnetfelder

Die Abschirmung durch Magnetfelder folgt dem Vorbild der Erde, die durch ihr Magnetfeld vor dem Großteil der kosmischen Strahlung geschützt ist. Vorteilhaft sind Magnetfelder vor allem, weil sie im Gegensatz zu elektrischen Feldern alle geladenen Teilchen abschirmen können. Erzeugt werden diese Magnetfelder in den zahlreichen verschiedenen Konzepten durch Ringströme in supraleitenden Spulen. Einige dieser Konzepte scheinen durchaus mit den bestehenden Technologien umsetzbar zu sein. Insbesondere die Verwendung von Hochtemperatursupraleitern könnte entsprechende Anwendungen ermöglichen. Problematisch sind aber die hohen Feldstärken, denen Crewmitglieder bei einem unbegrenzten Magnetfeld ausgesetzt wären sowie die enormen Energien, die in den Strömen stecken und bei Störungen freigesetzt werden könnten[72].

3.2 Passive Abschirmungen

Passive Abschirmungen bieten durch ihre Absorptionseigenschaften Schutz gegen Strahlung. Sie sind gewöhnlich auf die entsprechenden Anforderungen der jeweiligen Anwendungsgebiete eingestellt.

3.2.1 Anforderungen an passive Abschirmungen in der Raumfahrt

Bei der Auslegung der Abschirmung von hochenergetischer Strahlung in der Raumfahrt sind die speziellen Bedürfnisse der jeweiligen Mission zu beachten. Grundsätzlich ist es aufwendig und damit teuer, Masse von der Erdoberfläche aus in einen Orbit zu bringen. Daher ist es oberstes Ziel, Abschirmungen sowohl räumlich als auch durch Auswahl des Materials bzw. der Materialien in ihrer Masse zu optimieren. Deshalb kommen meistens sogenannte *spot shieldings*, die direkt auf die empfindlichen Bauteile aufgebracht werden, zum Einsatz.

Außerdem muss das Material entsprechend bearbeitet werden können, um den jeweiligen Anforderungen der Mission zu entsprechen. So muss die Abschirmung u.a. Schocklasten, akustischen und thermischen Belastungen beim Start und im Orbit standhalten. Zudem soll sie nicht ausgasen und muss bei bemannten Missionen unbedingt den hohen Sicherheitsbestimmungen genügen. Details zur Materialauswahl finden sich im zugehörigen ECSS-Standard [74].

3.2.2 Masseoptimierte Abschirmungen

Um möglichst wenig zusätzliche Masse zu erhalten, sollen Abschirmungen nach Möglichkeit masseoptimiert werden. Da die Effizienz passiver Abschirmungen von ihren Absorptionseigenschaften abhängt, ist diese auch von der vorherrschenden Strahlungsart und der Energieverteilung abhängig.

Die Absorption von Protonen (und anderen Ionen) kann mit der Bethe-Bloch-Gleichung (6) berechnet werden. Ein Blick auf diese Gleichung zeigt, dass sich das Bremsvermögen zum Absorbermaterial proportional zu Z/A verhält. Der Quotient Z/A ist für alle Elemente außer Wasserstoff ähnlich und sinkt mit steigender Kernladungszahl durch den zunehmenden Neut-

3. Abschirmstrategien gegen kosmische Strahlung bei Raumfahrtssystemen

ronenanteil tendenziell leicht ab. Deutlich wird dieser Zusammenhang in Abbildung 11, die exemplarisch das Bremsvermögen bei Protonen mit 10 MeV zeigt.

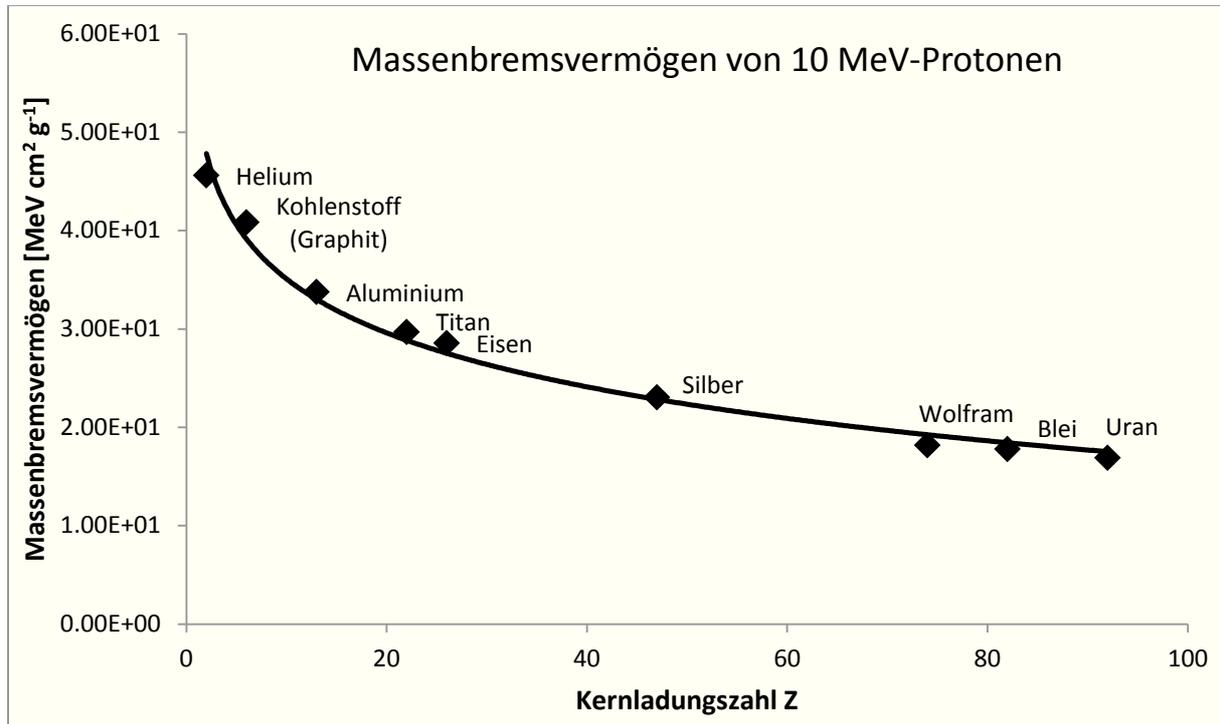


Abbildung 11: Das Massenbremsvermögen verschiedener elementarer Materialien beginnend bei Helium für Protonen mit einer kinetischen Energie von 10 MeV. Die Daten stammen aus PSTAR vom NIST [51].

Aus diesen Erkenntnissen ergeben sich zur masseoptimierten Abschirmung von Protonen folgende Schlüsse:

- Das ideale Absorbermaterial ist Wasserstoff, der zudem den Vorteil mitbringt, keine Neutronenstrahlung zu produzieren.
- Elemente niedriger Kernladung erzielen bessere Protonenabschirmung als solche mit hoher Kernladung. Außerdem ist die Neutronenproduktion bei leichten Kernen erheblich niedriger als bei schweren.

Da reiner Wasserstoff kaum verwendbar ist, sind Stoffe mit hohem Wasserstoffanteil gut geeignet. So werden beispielsweise in der ISS Platten aus Polyethylen ((C₂H₄)_n) zur Abschirmung eingesetzt [75] und auch Lithiumhydrid (LiH) ist theoretisch gut geeignet.

Bei Elektronen muss zusätzlich zur Energieabgabe durch Ionisation (Gleichung (7)) auch bei vergleichsweise niedrigen Energien bereits die Erzeugung von Bremsstrahlung (Gleichung (8)) berücksichtigt werden. So fällt analog zu Protonen der Ionisationsverlust mit steigender Elektronenenergie ab, während die Energieabgabe über Bremsstrahlung stark zunimmt. Gleichzeitig stellen die Bremsstrahlungsphotonen ihrerseits wiederum eine Belastung dar, die berücksichtigt werden muss. Bei den im Van-Allen-Gürtel vorherrschenden Energien bis etwa 7 MeV wird das Massenbremsvermögen von Elektronen bei allen Elementen bis zum Uran vom Ionisationsverlust dominiert. Dieser ist wie bei den Protonen proportional zum Quotienten Z/A des Absorbermaterials, weshalb auch hier Wasserstoff massenideal absorbiert. Das totale Massenbremsvermögen ist für verschiedene Energiebereiche abhängig von der Kernla-

3. Abschirmstrategien gegen kosmische Strahlung bei Raumfahrtssystemen

dungszahl in Abbildung 12 aufgetragen. Gut sichtbar wird hier der Einfluss des Energieverlusts durch Bremsstrahlung, der sich schon bei 10 MeV durch ein Ansteigen der Kurve zeigt.

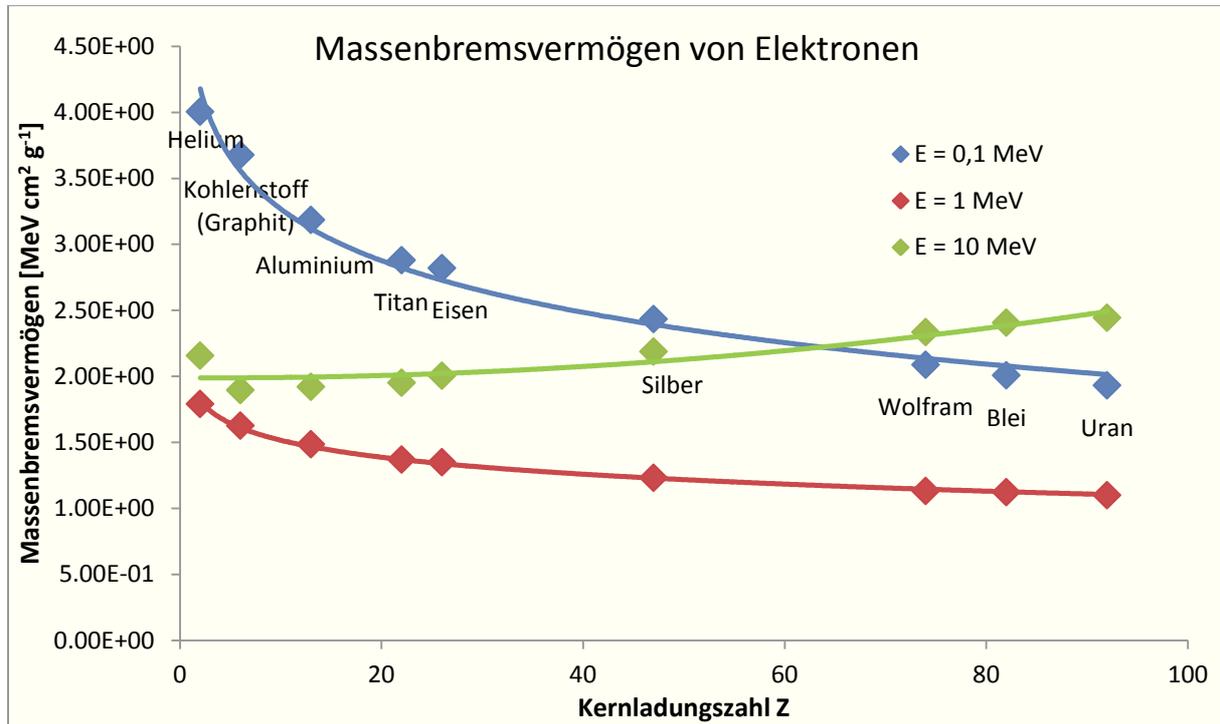


Abbildung 12: Das Massenbremsvermögen für Elektronen verschiedener Energiebereiche in Abhängigkeit von der Kernladungszahl. Die Daten stammen aus ESTAR vom NIST [51].

Durch die Bremsstrahlungserzeugung bei energiereichen Elektronen kann sich die Materialwahl für eine masseoptimierte Abschirmung aber nicht allein auf das Massenbremsvermögen stützen. Die erzeugten Röntgenphotonen und deren Abschwächung sind ebenfalls von Bedeutung. Entscheidend für die Abschwächung von Photonen ist nach Gleichung (11) der Massenschwächungskoeffizient, dessen Wert sowohl von der Energie als auch vom Material abhängt. Dieser verhält sich durch die Unterschiedlichkeit der ihm zugrundeliegenden Prozesse Photoeffekt, Compton-Streuung und Paarbildung nicht einheitlich zur Kernladungszahl. Die jeweilige Proportionalität ist in Tabelle 7 zu sehen.

Tabelle 7: Die Proportionalität der Massenabschwächungskoeffizienten zur Kernladungszahl. Nach [50].

Photoeffekt	Compton-Effekt	Paarbildung
$\frac{\mu_{Ph}}{\rho} \propto Z^3$	$\frac{\mu_{Compton}}{\rho} \propto \frac{Z}{A}$	$\frac{\mu_{Paar}}{\rho} \propto \frac{Z^2}{A}$

Da sich aber die Prozesse überlagern, schirmen meistens Stoffe hoher Kernladung besser ab. Das hat zur Folge, dass in elektronendominierten Orbits wie MEO, GEO oder beim Jupiter Elemente hoher Kernladungszahlen wesentlich effizienter abschirmen. Dies ist trotz der erhöhten Bremsstrahlungserzeugung der Fall, wie aus dem Beispiel des GPS-Orbits (ein MEO mit $h = 20.200$ km, $i = 55^\circ$) in Abbildung 13 hervorgeht. Bei einer identischen Massenbelegung von $1,35$ g/cm² (entsprechend 5 mm Al eq.) erreichen Kombinationen (jeweils 50% Massenanteil) von leichten, wasserstoffreichen Materialien wie Polyethylen mit schweren wie

3. Abschirmstrategien gegen kosmische Strahlung bei Raumfahrtssystemen

Tantal oder Wolfram eindeutig die besten Ergebnisse. Dabei ist außerdem entscheidend, welches Material außen sitzt, denn die umgekehrte Reihenfolge verursacht die dreifache Dosis. Die Erklärung dafür ist, dass die Elektronen bereits in der wasserstoffreichen Schicht Energie abbauen können und dort und auch danach (durch die effektivere Bremsung) nicht mehr so viel Bremsstrahlung erzeugen wie in einem Material mit hohem Z . Zudem schirmt die nachgeschaltete schwere Schicht die bereits weiter außen entstandenen γ -Quanten besser ab.

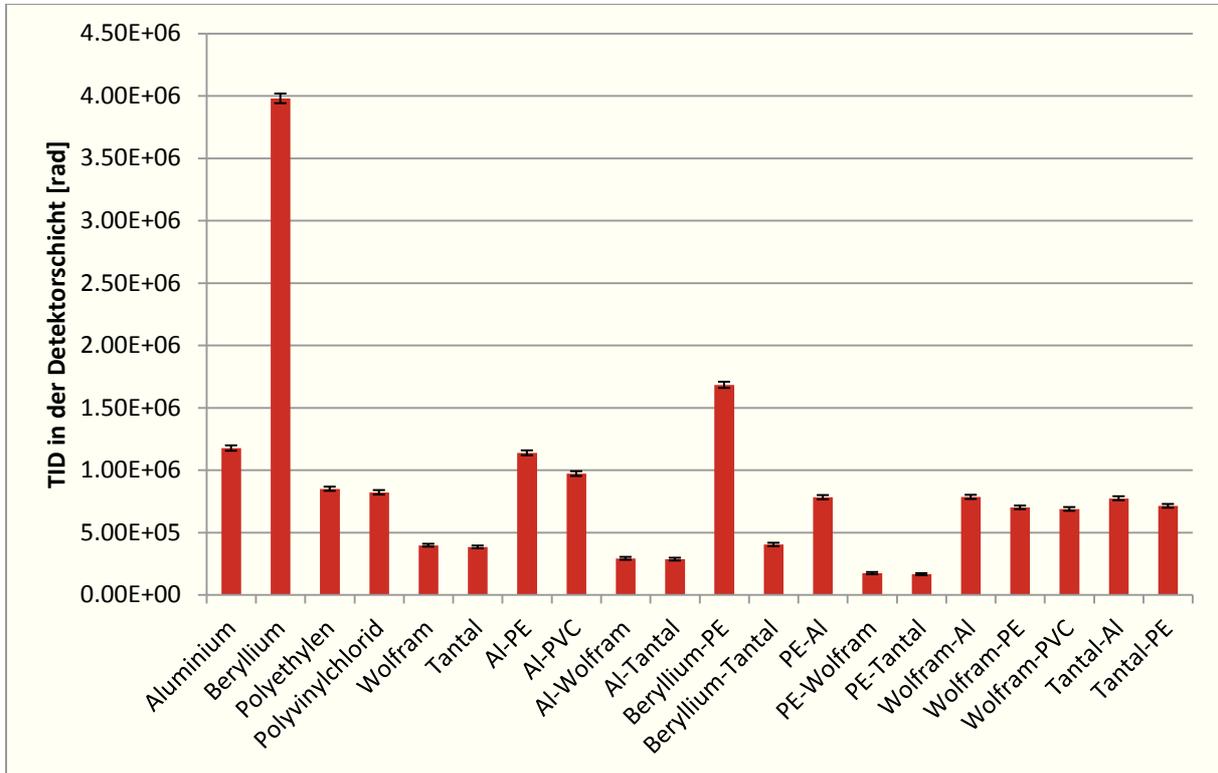


Abbildung 13: Gesamtdosis in Silizium nach 10 Jahren im GPS-Orbit hinter einer Schicht mit einer Massenbelegung von $1,35 \text{ g/cm}^2$ (aus [76]), wobei bei Schichten aus zwei Materialien das erstgenannte außen liegt. Die entsprechenden Simulationen wurden mit MULASSIS durchgeführt.

Ähnliche Ergebnisse ergeben sich für den geostationären Orbit, auch wenn dort die Unterschiede nicht so extrem sind [76], da hier die Dosis durch solare Protonen bedeutender als im MEO ist und im Strahlungsgürtel von Jupiter [77].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in der Regel in elektronendominierten Missionen Schichtungen aus einem leichten, wasserstoffreichen, außen liegenden und einem Material hoher Kernladungszahl masseoptimal abschirmen.

3.2.3 Methoden zur Optimierung

Da bei Missionen verschiedene Strahlungsarten unterschiedlicher Energie und Intensität auftreten, muss durch die Komplexität der Anforderungen im Einzelfall nach der idealen Kombination gesucht werden. Bedeutsam sind masseoptimierte Abschirmungen vor allem für Missionen, die in extreme Gebiete wie z.B. in Jupiters Strahlungsgürtel oder nahe an die Sonne führen. Diese Optimierung kann mit Simulationsmessreihen erreicht werden, wobei diese unter Umständen einen hohen Aufwand bedeuten können.

3. Abschirmstrategien gegen kosmische Strahlung bei Raumfahrtsystemen

liten ändert. So werden beispielsweise primäre Elektronen stark reduziert und dafür Bremsstrahlungsphotonen erzeugt. Zum anderen reduziert sich die Dauer der Monte-Carlo-Simulation, da nur die tatsächlich benötigte Abschirmungsschicht berücksichtigt werden muss.

4 Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

Die Abschirmwirkung von Wabenkern-Sandwichstrukturen, die in der Raumfahrt häufig Verwendung finden, wurde bisher nicht untersucht, obwohl diese durchaus relevant sein kann. Im Hinblick auf Gewichtsersparnis gerade bei aus Sicht der Strahlenbelastung besonders herausfordernden Missionen (z.B. in den Strahlungsgürteln Jupiters) ist eine Berücksichtigung dieser Wabenkerne sinnvoll. Gleichzeitig ist es aus Gründen des Modellierungsaufwands nahezu unmöglich, größere Paneele dieser feinen Strukturen exakt nachzubilden. Dieses Kapitel zeigt, dass man auf einfache und praxistaugliche Weise die Waben im Modell nachbilden und damit in der Strahlungsanalyse verwenden kann.

4.1 Wabenkern-Sandwichplatten

Bei der Konstruktion von Raumfahrtstrukturen kommt in der Regel Sandwichbauweise zum Einsatz. Die Sandwichplatten haben meistens einen Wabenkern aus Aluminiumlegierungen mit hexagonalen Zellen. Dieser Wabenkern ist an zwei parallele Deckplatten geklebt, die gewöhnlich aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) oder Aluminium bestehen [80]. Der Wabenkern selbst besteht aus einzelnen, dünnen Bändern. Diese sind aus Folien ausgeschnitten, gefaltet und an den entsprechenden Berührflächen geklebt. Eine Darstellung des Aufbaus sowie der Größendefinitionen befindet sich in Abbildung 15.

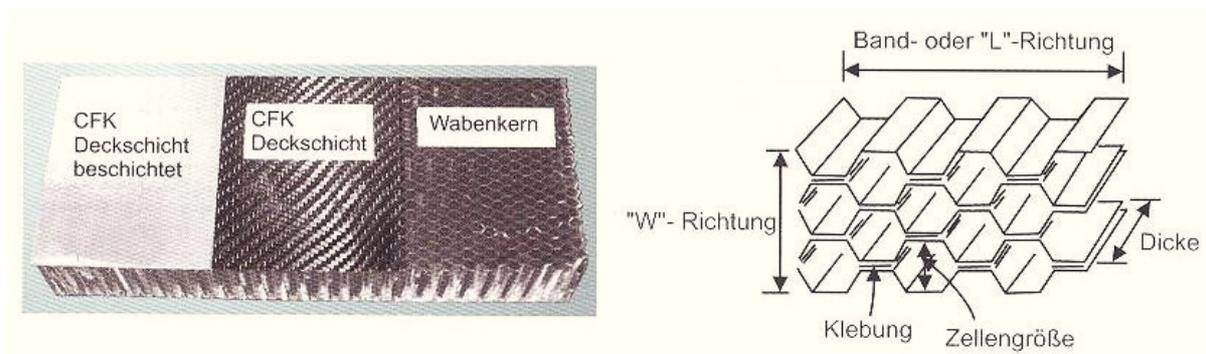


Abbildung 15: Aufbau eines Sandwichpanels mit Wabenkern [80].

Die Nomenklatur für die Wabenkernspezifikation besteht üblicherweise aus der Sequenz Zellengröße [inch]-Foliendicke [inch]-Legierung [Seriennummer], wobei manchmal auch zusätzlich Materialeigenschaften benannt werden.

4.2 Das untersuchte Sandwichmodell

Das im Folgenden mit der Software GRAS [70] untersuchte Wabenmodell wurde mit ESABASE2 [81] erstellt und dann ins GDML-Format [71] transformiert. Es besteht aus etwa 2100 Quadern mit den Maßen 2,75mm x 0,01778mm x 19,25mm, aus denen die Waben geformt sind und die aus der Aluminiumlegierung Leg.5056 bestehen. Die exakten Zusammensetzungen dieser für die Waben gängigen Legierung [82] können der Literatur entnommen werden [83]. Im verwendeten GDML-Modell wurden die in Tabelle 8 angegebenen Werte

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

benutzt. Dort ist ebenfalls die CFK-Definition erläutert, deren chemische Bestandteile sich daraus ableiten, dass CFK aus Kohlenstofffasern in einer Kunststoff-Matrix (z.B. Epoxid) besteht.

Tabelle 8: Die Materialdefinition im der GDML-Geometriedatei.

Material	Elementare Bestandteile (Anteil)	Dichte [g/cm ³]
Leg. 5056	Al (94,8%), Mg (5,0%), Cr (0,1%), Mn (0,1%)	2,64
CFK	C (72,7%), H (18,2%), O (9,1%)	1,75

Die Maße für die Wabenstruktur sind in der Raumfahrt gängige Größen mit der Bezeichnung 3/16-.0007-5056P [84] und in Abbildung 16 dargestellt.

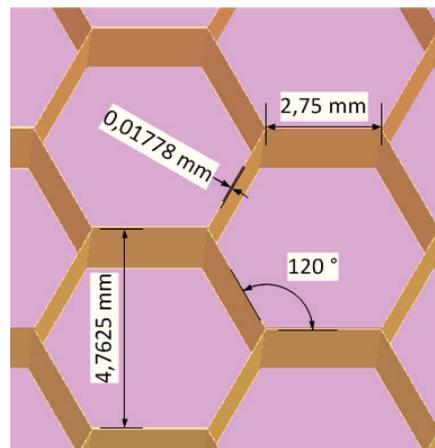


Abbildung 16: Die Abmessungen der Wabenzellen.

Die Gesamtdicke von 20mm, die sich auf zwei 0,375mm dicke Deckplatten und 19,25mm hohe Waben verteilt, ist ebenfalls eine übliche Abmessung, wobei es auch andere Gesamt- und Deckplattendicken gibt [84]. Diese Abmessungen sowie die der in den Simulationen verwendeten Paneele und Targets zur Dosismessung sind in Abbildung 17 zu sehen.

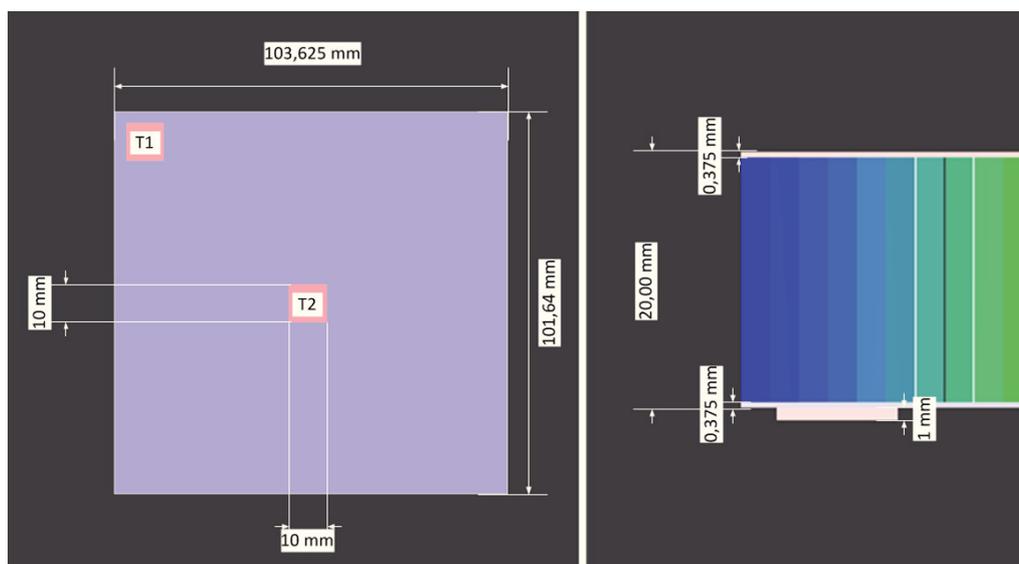


Abbildung 17: Links die Abmessungen der Deckplatten und damit des gesamten Paneelstücks und die der verwendeten Targets T1 und T2. Rechts die Ausmaße des Paneels und der Targets von der Seite.

4.3 Versuchsanordnung der Simulation

Die Versuchsanordnung der Simulation ist in Abbildung 18 schematisch wiedergegeben. Die Teilchenquelle ist eine annähernd quadratische Platte, die dieselben Maße wie das Paneel hat. Die in der Quelle erzeugten Teilchen verlassen diese in Richtung Paneel, wobei die Wahrscheinlichkeit ihrer Erzeugung vom Winkel θ zwischen der Flugrichtung und der Normalen zur Quelle abhängt. Die Verteilung erfolgt gemäß dem Kosinusetz. Die tatsächliche Position der Quelle ist in der Simulation 0,5 mm über der oberen Deckplatte.

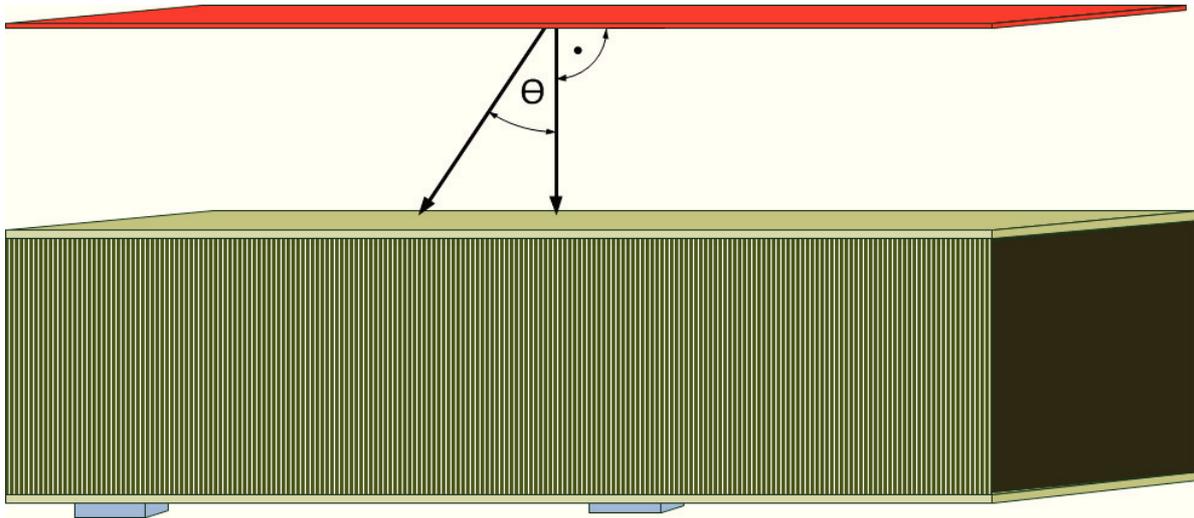


Abbildung 18: Schematische Versuchsanordnung. Die Teilchenquelle ist die rote Platte, von wo die Teilchen kosinusverteilt zur Flächennormalen in Richtung Paneel geschossen werden.

4.3.1 Vergleichskonfigurationen

Untersucht werden neben dem Sandwichpaneel mit Wabenkern zwei weitere Konfigurationen. Zum einen nur die reinen Deckplatten aus CFK ohne den Wabenkern, zum anderen die Deckplatten mit einer sogenannten Äquivalentplatte in der Mitte. Die Deckplattenkonfiguration soll zeigen, um wie viel man bei Vernachlässigung des Wabenkerns die Dosis überschätzt. Die Äquivalentplatte vereint die Masse und das Material der Waben in sich, d.h. die gesamte Anordnung hat dieselbe Masse wie die Waben-Sandwichplatte. Diese Konfiguration soll zeigen, ob man bei der Modellierung von Sandwichpaneelen die Masse der Wabenstruktur einfach auf eine Platte gleicher Masse "verschmieren" darf. Im konkret betrachteten Fall der Gesamtsandwichdicke von 20 mm hat die Äquivalentplatte ein Massenbelegung von

$$d_{\text{Äquivalentplatte}} = \frac{n_{\text{Waben}} \cdot V_{\text{Wabenkörper}} \cdot \rho_{\text{Leg5056}}}{A_{\text{Panel}}} = 0,04955 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2},$$

was einer Dicke von 0,1877 mm entspricht.

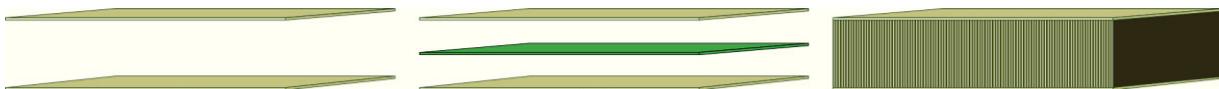


Abbildung 19: Die drei Konfigurationen in der Seitenansicht von links nach rechts: Nur Deckplatten, Deckplatten und Äquivalentplatte und komplettes Paneel mit Wabenkern.

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

Zudem wird, um den Einfluss der Gesamtdicke festzustellen, die Höhe der Waben und die entsprechende Dicke der Äquivalentplattenkonstruktion für Zusatzmessungen variiert. Dabei wird der Teil zwischen den Deckplatten um 10 mm verringert bzw. erhöht, so dass die Gesamtdicke der Anordnung 10 bzw. 30 mm erreicht. Die Waben werden dadurch entsprechend höher und in ebensolchem Maß wird auch die Äquivalentplatte angepasst.

4.3.2 Testspektren

Für die Untersuchung wurden drei verschiedene Spektren verwendet. Die ersten beiden entsprechen denen eines Satelliten, der sich zehn Jahre lang vom (01.01.2010 - 30.12.2019, jeweils 0 Uhr) im geostationären Orbit aufhält und wurden mit SPENVIS [20] erzeugt. Dabei wurde für die Elektronen des Van-Allen-Gürtels das Modell AE-8 MAX [36] in Verbindung mit dem Magnetfeldmodell von Jensen & Cain [85] verwendet und für die solaren Protonen ESP [24] mit magnetischer Abschirmung und 95% Wahrscheinlichkeit, den Wert nicht zu überschreiten. Die Methode, mit der SPENVIS hier die magnetische Abschirmung berücksichtigt, ist das Størmer'sche Modell des exzentrischen Dipols [86]. Da die Energie der Protonen des Strahlungsgürtels nach dem Modell AP-8 MAX [32] 2 MeV nicht überschreitet, wurden diese nicht simuliert, da diese Protonen die Anordnung nicht durchdringen können. Der Elektronenfluss bzw. die Protonenfluenz ist in Abbildung 20 zu sehen. Die erstellten Spektren wurden für die Simulation zur Einsparung von Rechenzeit beschnitten. Da Elektronen und Protonen mit Energien unterhalb des Schnitts weder die Deckplatte durchdringen können noch signifikant Sekundärteilchen erzeugen, wird durch diese Maßnahme kein Fehler gemacht. Ersichtlich wird dieser Umstand in Abbildung 22, in dem die Reichweiten von Elektronen und Protonen in Graphit (vergleichbar zum Deckplattenmaterial CFK) gegen deren kinetische Energie aufgetragen sind.

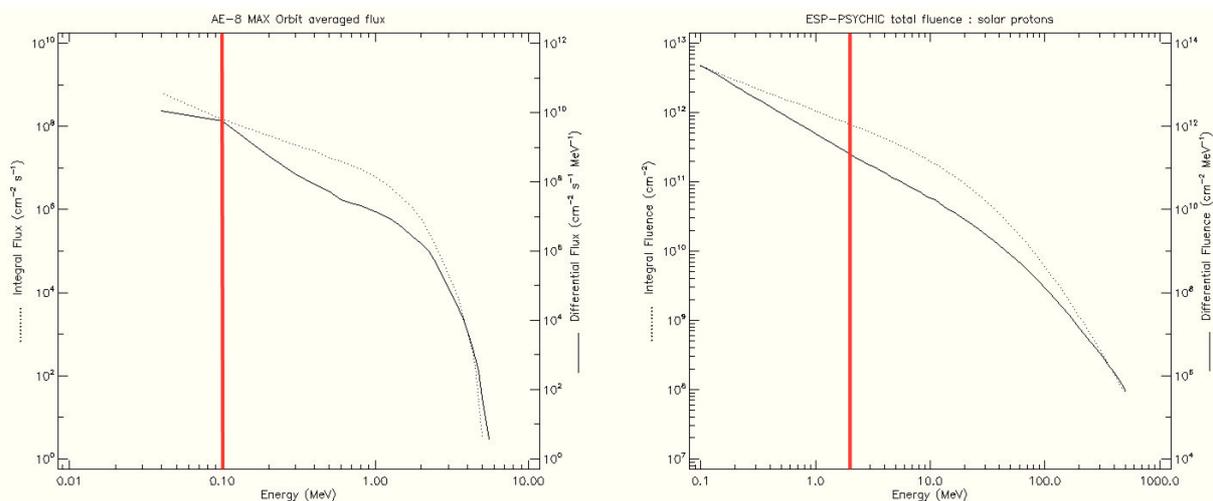


Abbildung 20: Das Flusspektrum der Van-Allen-Elektronen und die Fluenz der solaren Protonen berechnet mit SPENVIS [20]. Links der roten Linien befindet sich der energiearme Teil des Spektrums, der zum Einsparen von Rechenzeit abgeschnitten wurde.

Neben den gängigen Energieverteilungen für die Elektronen des Strahlungsgürtels und den solaren Protonen wurde außerdem noch ein drittes Spektrum untersucht, nämlich das von Elektronen aus dem Strahlungsgürtel des Jupiters. Da diese wesentlich höhere Energien als die des irdischen Van-Allen-Gürtels erreichen, ist das Verhalten der Waben diesen gegenüber von Bedeutung. Der zugehörige Orbit ist der der JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer) Missi-

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

on. Verwendet wurde der während der Zeit in Jupiterorbits auftretende, gemittelte Elektronenfluss. Die Werte dafür stammen aus [77] (erstellt mit dem JOSE-Modell [44]) und sind in Abbildung 21 zu sehen. Auch hier wurden der besseren Berechenbarkeit wegen Werte unter 0,1 MeV abgeschnitten. Alle numerischen Werte der Spektren sind in Anhang A in Tabelle 41 bis Tabelle 44 zu finden.

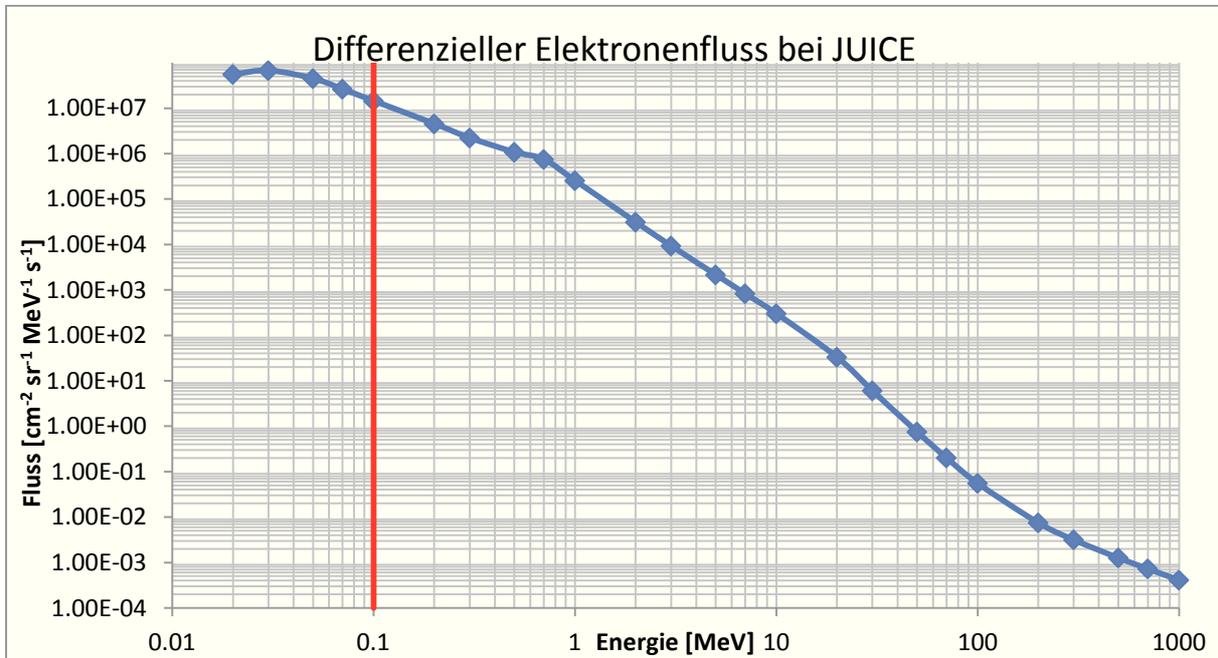


Abbildung 21: Der gemittelte differenzielle Elektronenfluss bei der JUICE-Mission. Die Basiswerte stammen aus der JUICE Environment Specification [77] und wurden für die Jupiterorbitphase gemittelt.

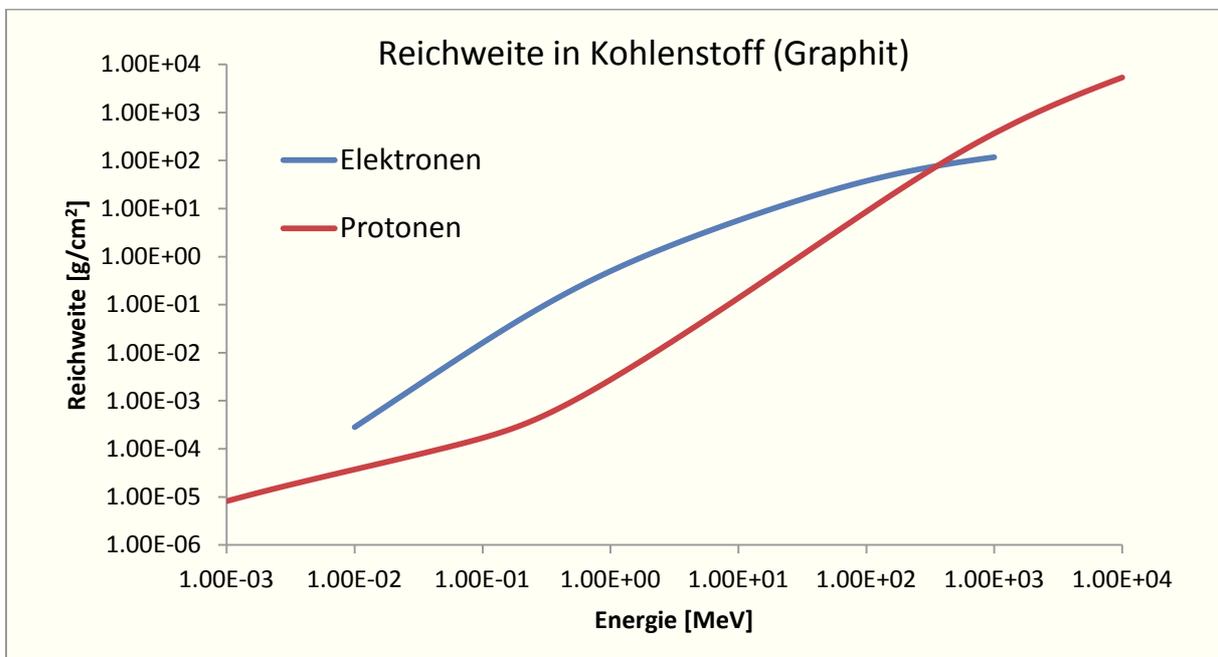


Abbildung 22: Die Reichweiten von Elektronen und Protonen in Graphit. Die Daten stammen aus ESTAR und PSTAR vom NIST [51].

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

4.3.3 Konfiguration von GRAS

In Tabelle 9 befindet sich die Konfiguration, in der die Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt wurden. Das Programm GRAS ist in Abschnitt 2.5.2.4 dargestellt.

Tabelle 9: Die Einstellungen, die bei den Monte-Carlo-Simulationen mit GRAS verwendet wurden.

GRAS		
Bereich	Einstellung	Beschreibung
Physikalische Modelle	em_standard	Elektromagnetisches Modell
Physikalische Modelle	QGSP_BIC_HP, decay, binary_ion, gamma_nuc, stopping	Modelle zur Beschreibung hadronischer Physik
Cutlänge	1 μm	Produktionsschwelle, ab der Sekundärteilchen erzeugt werden
Startpunkt	9876, 54321	Standardstartpunkt

Der Startpunkt war i.A. der in Tabelle 9 genannte. Bei Zusatzmessungen zur Verbesserung der Messgenauigkeit wurde der Startpunkt mittels Zufallsgenerator (Befehl "autoSeed") variiert.

4.3.4 Winkelauswahl zur Untersuchung der Winkelabhängigkeit

Die Verteilung der Einfallswinkel der auf eine Fläche auftreffenden Teilchen eines omnidirektional verteilten Strahlungsfeldes folgt einem Kosinusetz. Demnach nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen mit Einfallswinkel θ (gegenüber der Flächennormalen) einfällt mit zunehmendem θ ab. Um nun eine mögliche Winkelabhängigkeit der Abschirmwirkung des Sandwichpaneels festzustellen, werden die Einfallswinkel in einer Extraanalyse gesondert untersucht. Dazu wird das Spektrum in zehn Intervalle unterteilt, die jeweils 10% aller auf die Einheitsfläche auftreffenden Teilchen enthalten. Der Winkel, mit dem dann alle Teilchen des Intervalls auf die Platte geschossen werden, ist der Intervallschwerpunkt, d.h. der Median der im Intervall auftretenden Winkel.

Tabelle 10: Eine Winkelverteilung von 0 bis 90° nach dem Kosinusetz in 10 Intervalle mit der gleichen Teilchenzahl unterteilt und dem jeweiligen Schwerpunkt.

Intervallbeginn [°]	Intervallende [°]	Intervallschwerpunkt [°]
0	5.74	2.87
5.74	11.54	8.63
11.54	17.46	14.48
17.46	23.58	20.49
23.58	30.00	26.74
30.00	36.87	33.37
36.87	44.43	40.54
44.43	53.13	48.59
53.13	64.16	58.21
64.16	90.00	71.81

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

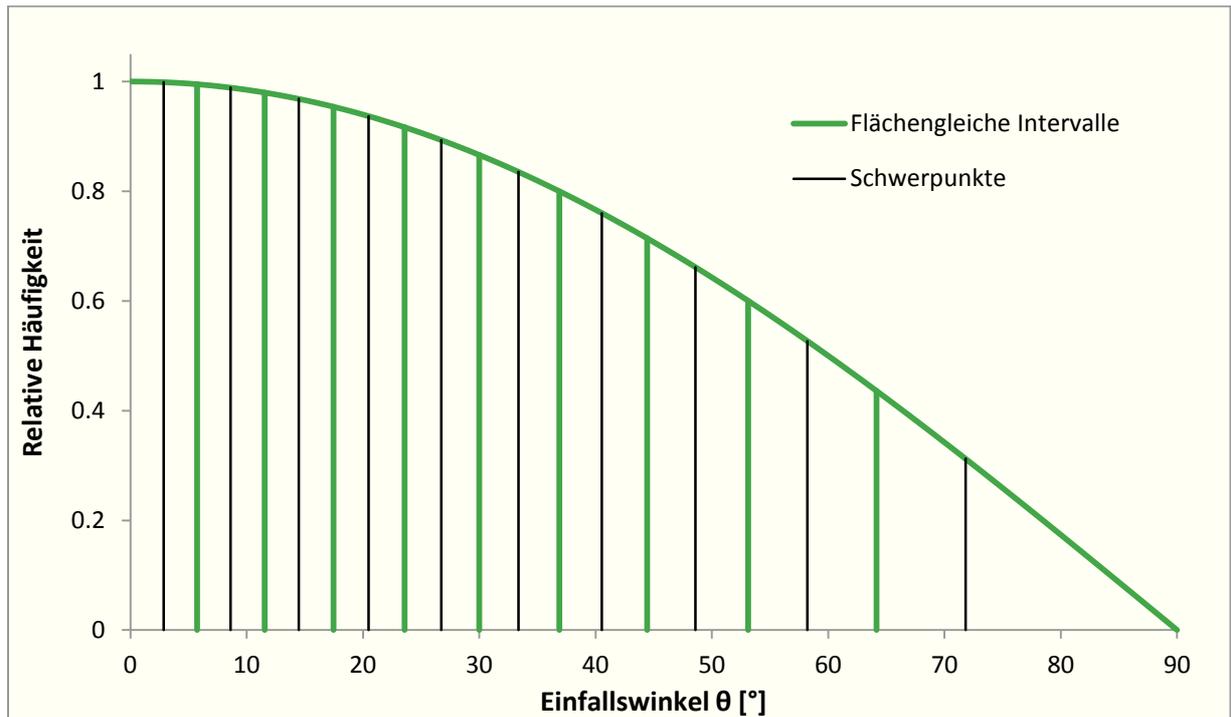


Abbildung 23: Die Kosinusfunktion in Intervalle gleicher Flächen unterteilt, was auch gleicher Teilchenzahl im Spektrum entspricht.

Unter diesem Schwerpunktwinkel werden dann in der Simulation jeweils genau 10% der Teilchen der Gesamtfluenz abgeschossen, um den Einfluss des Einfallswinkels auf das Funktionieren der Äquivalentplattenmethode sichtbar zu machen.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Dosis der drei Konfigurationen

4.4.1.1 Absorbierte Energiedosis in den beiden Targets

Um die Abschirmwirkung der Wabenstrukturen in den Sandwichplatten bestimmen zu können, werden neben dem Sandwichpaneel mit Wabenstruktur die zwei weiteren Anordnungen untersucht. Dabei ergeben sich die folgenden in Tabelle 11 sowie graphisch in Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellten Ergebnisse.

Tabelle 11: Die Ergebnisse der drei verschiedenen Konfigurationen.

Konfiguration	Spektrum	Dosis T1 [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %	Dosis T2 [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Nur Deckplatten	Sol. P ⁺	8.96E+03	2.49E+02	2.77%	1.76E+04	3.50E+02	1.98%
	Van-Allen e ⁻	6.14E+06	1.04E+05	1.69%	1.19E+07	1.48E+05	1.24%
	Jupiter e ⁻	1.84E+06	1.54E+04	0.84%	3.46E+06	2.13E+04	0.62%
Deckplatten + Äquivalentplatte	Sol. P ⁺	7.40E+03	1.05E+02	1.43%	1.45E+04	1.50E+02	1.04%
	Van-Allen e ⁻	4.37E+06	6.33E+04	1.45%	8.42E+06	8.79E+04	1.04%
	Jupiter e ⁻	1.30E+06	1.33E+04	1.02%	2.48E+06	1.84E+04	0.74%
Waben-Sandwichplatte	Sol. P ⁺	7.67E+03	1.08E+02	1.41%	1.47E+04	1.50E+02	1.02%
	Van-Allen e ⁻	4.60E+06	6.37E+04	1.38%	8.33E+06	1.07E+05	1.29%
	Jupiter e ⁻	1.34E+06	1.33E+04	1.00%	2.52E+06	1.85E+04	0.74%

Es wird sofort sichtbar, dass die ausschließliche Verwendung der Deckplatten sowohl bei Protonen (etwa 15% gegenüber dem Wabensandwich) als auch bei Elektronen (jeweils etwa 35%) zu einem erhöhten Dosiswert führt. Daraus ergibt sich, dass die Wabenstruktur in den Sandwichpaneelen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Abschwächung der Strahlung hat. Insbesondere bei den Elektronenspektren zeigt sich dieser Effekt verstärkt.

Die Werte, die die Konfiguration mit der Äquivalentplatte liefert, reproduzieren die Wabenstruktur hingegen relativ gut. So stimmen die Werte für beide Teilchensorten für das Target 2 innerhalb der statistischen Fehler sehr gut miteinander überein. Bei den beiden Werten des Targets 1 ist die Dosis der Äquivalentplatte zwischen 2,4% und 5% niedriger als die der Wabenstruktur.

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

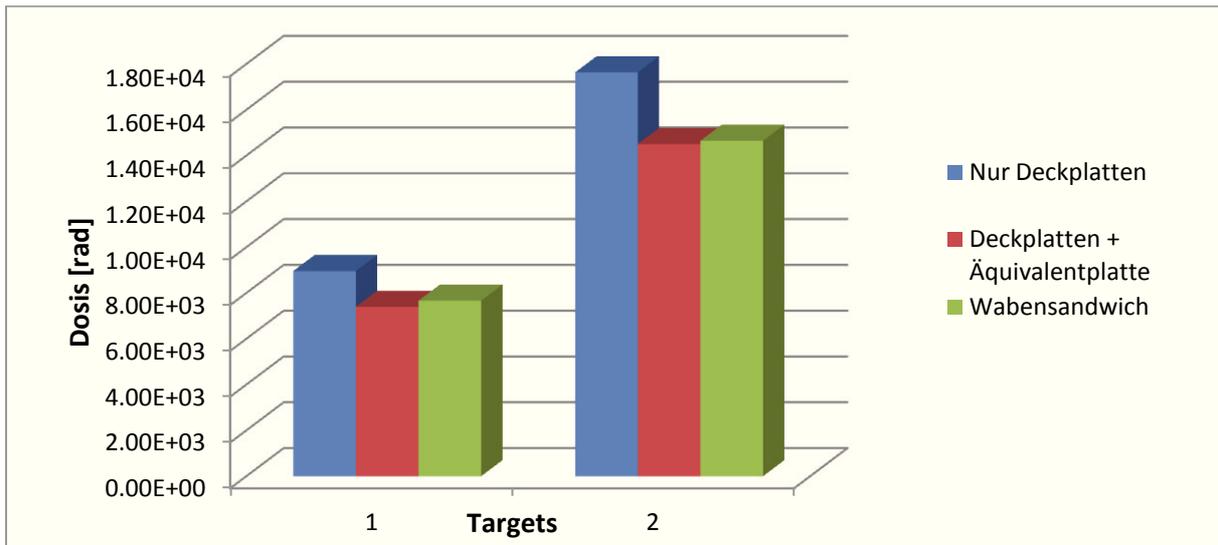


Abbildung 24: Die absorbierte Dosis durch solare Protonen der drei Konfigurationen im Vergleich.

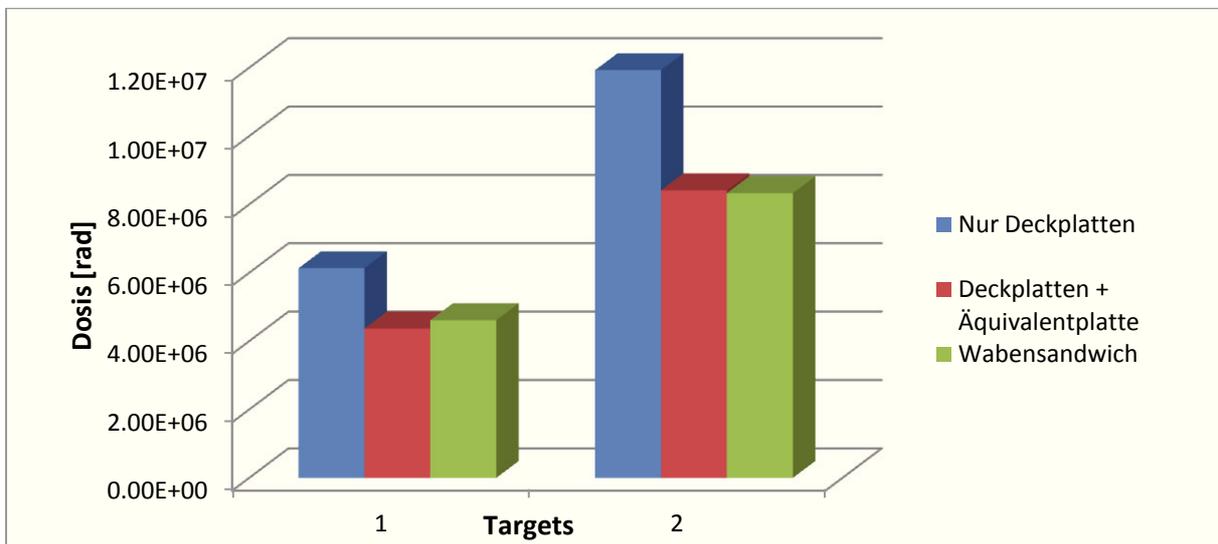


Abbildung 25: Die absorbierte Dosis durch Van-Allen-Elektronen der drei Konfigurationen im Vergleich.

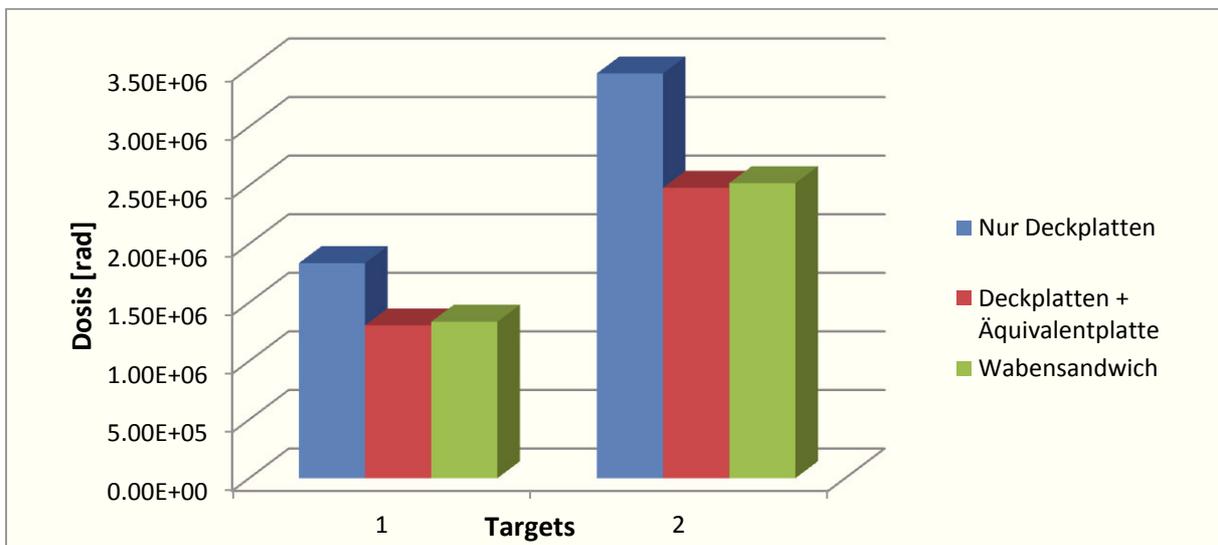


Abbildung 26: Die absorbierte Dosis durch Jupiter-Elektronen der drei Konfigurationen im Vergleich.

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

4.4.1.2 Variation der gesamten Sandwichdicke

Die Variation der Gesamtdicke der Sandwiches in einem für die Praxis relevanten Bereich von 10 bis 30 mm ergab die folgenden in Abbildung 27 dargestellten prozentualen Abweichungen der Wabenkernanordnung von der Äquivalentplattenkonstruktion. Die kompletten Werte befinden sich in Tabelle 45 und Tabelle 46 im Anhang. Die Abweichung berechnet sich gemäß der Formel

$$\text{Abweichung [\%]} = \left(1 - \frac{\text{Wert}_{\text{Äquivalentplatte}}}{\text{Wert}_{\text{Wabenkern}}} \right) \cdot 100\% \quad (15).$$

Der statistische Fehler der Abweichung wurde mit dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz und den jeweiligen, sich aus der Monte-Carlo-Simulation ergebenden Standardabweichungen (in der Formel mit Δ bezeichnet) bestimmt:

$$\Delta\text{Abweichung [\%]} = \sqrt{\left(\frac{\text{Wert}_{\text{Äquivalentplatte}}}{\text{Wert}_{\text{Wabenkern}}} \Delta\text{Wert}_{\text{Wabenkern}} \right)^2 + \left(-\frac{1}{\text{Wert}_{\text{Wabenkern}}} \Delta\text{Wert}_{\text{Äquivalentplatte}} \right)^2} \quad (16).$$

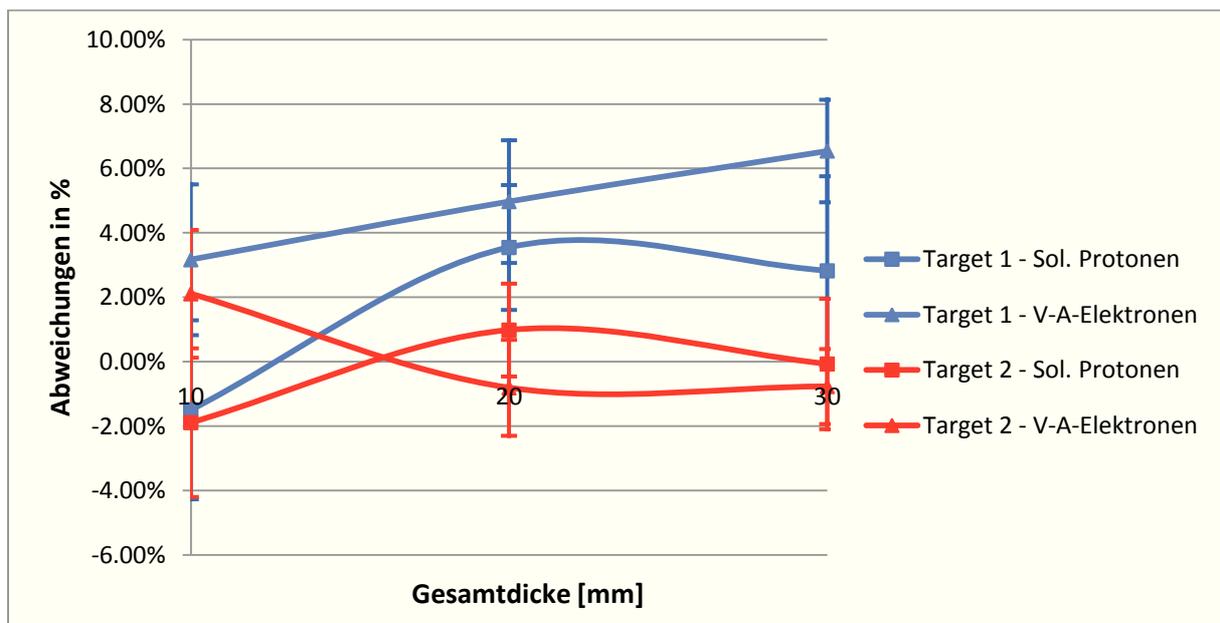


Abbildung 27: Die prozentualen Abweichungen der Anordnung mit Wabenkern zu der mit der Äquivalentplatte.

Es ist ersichtlich, dass keine der Abweichungen 10 % überschreitet. Die Verläufe für die entsprechenden Teilchengattungen bzw. Targets erscheinen beliebig, was sich durch die statistischen Fehler der Messungen, die nach Formel (16) zwischen 1,16% und 2,94% betragen, erklären lässt. Fasst man alle Abweichungen zusammen, ergibt sich eine durchschnittliche Abweichung von etwa 2,5%. Die Schlussfolgerung dieser Berechnungen ist, dass eine Variation der Gesamtdicke im Rahmen realistischer Abmessungen keinen Einfluss auf die Anwendbarkeit der vereinfachten Konstruktion hat.

4.4.2 Fluenzen hinter den Anordnungen

Der Vergleich der Teilchenfluenzen durch eine imaginäre Platte, die direkt hinter der inneren Abdeckplatte angebracht ist, soll Aufschluss über die Art und Verteilung der passierenden bzw. erzeugten Teilchen geben. Damit soll sichtbar gemacht werden, ob die Ersatzkonstruktion die Realität ausreichend gut reproduziert, was durch die vergleichbaren Dosen nicht abschließend bewiesen werden kann.

4.4.2.1 Solare Protonen

Bei Bestrahlung mit dem Spektrum solarer Protonen werden neben diesen beim Transport durch das Material Sekundärteilchen erzeugt. Diese sind in erster Linie Elektronen, Gammas und Neutronen. Gammas und Neutronen machen hinter der Anordnung weniger als 1% bzw. 0,1% der Protonenzahl aus und werden daher hier nicht ausführlich diskutiert. Der Elektronenanteil liegt zwar bei fast 10% der Protonen, diese haben aber zu 97% Energien kleiner als 100 keV, was sie uninteressant macht.

Der aus Sicht der Strahlenbelastung relevante Teil dieser Simulation ist die Protonenfluenz, die in Abbildung 28 zu sehen ist. Deutlich sichtbar ist, dass insgesamt wesentlich mehr Protonen die Anordnung der Deckplatten penetrieren können. In absoluten Zahlen sind das 16% mehr Protonen als mit Wabenstruktur und 17% mehr als bei der Äquivalentplatte. Diese höheren Fluenzen sind vor allem bei niedrigen Energien bis etwa 20 MeV deutlich, gleichen sich dann aber zunehmend denen der anderen beiden Konfigurationen an. Dies erklärt sich aus dem Energieverlust, den die Protonen beim Durchgang durch Materie erleiden. Dieser nimmt für zunehmende Energien stark ab, d.h. die Protonen höherer Energie durchqueren das zusätzliche Material ohne merkliche Bremsung. Ergo gleichen sich die Spektren der Konfigurationen in diesem Energiebereich.

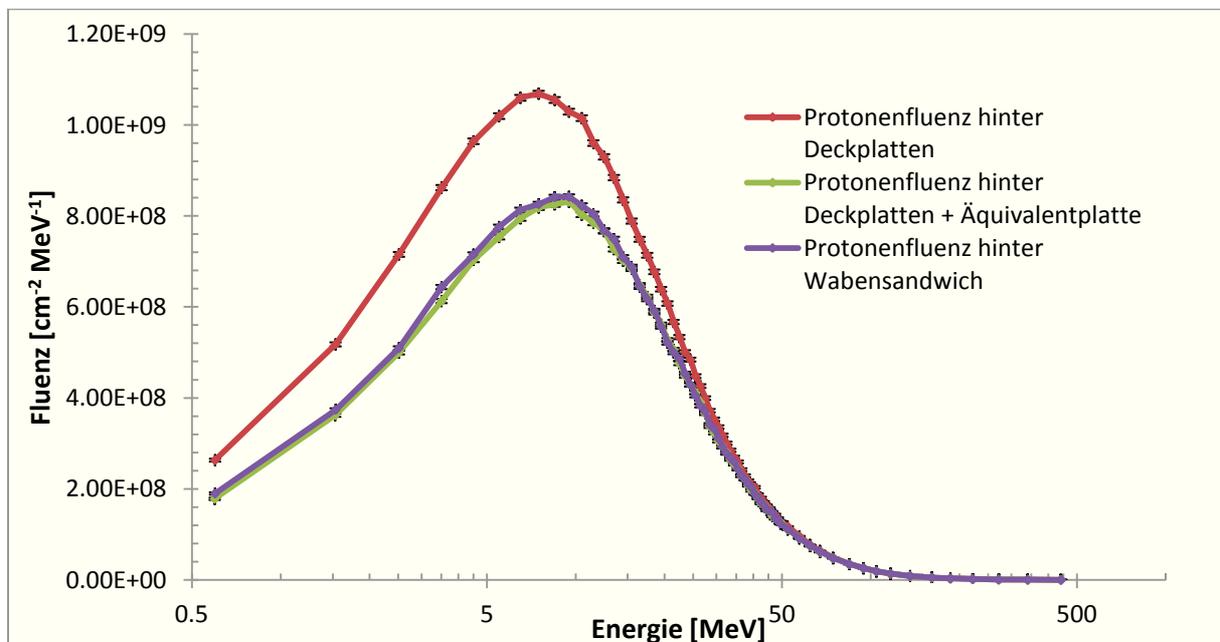


Abbildung 28: Die differenzielle Protonenfluenz hinter den jeweiligen Anordnungen nach Bestrahlung mit solaren Protonen.

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

Bei genauerer Betrachtung der Waben- und der Äquivalentplattenkonstruktion zeigt die Wabenkonstruktion leicht über der statistischen Abweichung liegende Werte, was aber fast ausschließlich den Energiebereich bis etwa 12 MeV betrifft. Die Gesamtzahl der registrierten Protonen liegt für die Waben um etwa 1,1 (+/-0,1)% höher als bei der Äquivalentplatte. Damit deckt sich das Ergebnis mit der Beobachtung der Dosiswerte.

4.4.2.2 Van-Allen-Elektronen

Auch die Bestrahlung mit dem Spektrum der Elektronen des Van-Allen-Gürtels erzeugt Sekundärteilchen. Dies sind auf Grund der Elektronenenergie von maximal 5,5 MeV aber ausschließlich Photonen. Die Verteilung dieser Photonen ist in Abbildung 29 zu sehen. Dabei fällt auf, dass hinter der ausschließlich aus Deckplatten bestehenden Anordnung wesentlich mehr γ -Quanten gezählt werden: Es sind absolut etwa 15% mehr als bei den anderen beiden Konfigurationen. Allerdings befinden sich diese vorwiegend im niedrigen Energiebereich bis etwa 20 keV. Bei höheren Photonenenergien sind dagegen die Fluenzen hinter den beiden anderen Anordnungen höher. Bei niedrigen Energien ist auch zu beobachten, dass das Wabensandwich höhere Fluenzen erzeugt als die Äquivalentplattenanordnung. Insgesamt erzeugen aber beide Anordnungen im Rahmen des Fehlers dieselbe Zahl an Photonen. Die großen Abweichungen bei kleinen Energien lassen sich gut mit der zusätzlichen Masse zwischen den Deckplatten erklären. So werden die Photonen geringer Energie, die beim Auftreffen der Elektronen auf die äußere Deckplatte entstehen, nahezu komplett von der zusätzlichen Masse bei Waben- und Äquivalentplattenanordnung absorbiert, wobei einige Photonen die Waben unabgelenkt passieren, was die etwas höheren Fluenzen der Waben bei niedriger Energie erklärt. Bei höheren Energien dagegen gibt es bei den Wabenkern- und Äquivalentplattenanordnungen mehr Photonen, da das zusätzliche Wabenkernmaterial höhere Kernladungszahlen als die Deckplatten besitzt und daher auch mehr Bremsstrahlungsphotonen erzeugt.

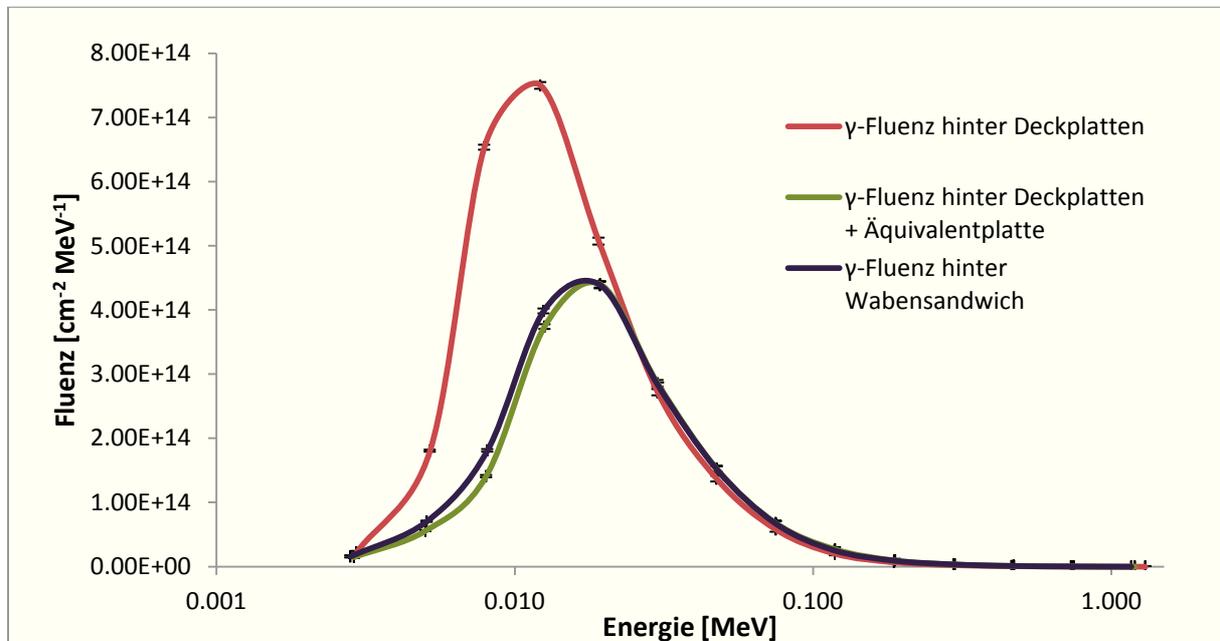


Abbildung 29: Die differentiellen Photonenfluenzen hinter den jeweiligen Anordnungen nach Bestrahlung mit den Van-Allen-Elektronen.

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

Neben den gerade diskutierten Photonen passieren natürlich zahlreiche Elektronen die Anordnung direkt. Die differenzielle Fluenz dieser Elektronen ist in Abbildung 30 aufgetragen. Die nur aus Deckplatten bestehende Konfiguration weist die höchste Elektronenfluenz auf – aufsummiert sind es über 50% mehr Elektronen als die Äquivalentplattenanordnung. Die Wabenstruktur passieren insgesamt etwa 3,5% mehr Elektronen als die Ersatzkonstruktion.

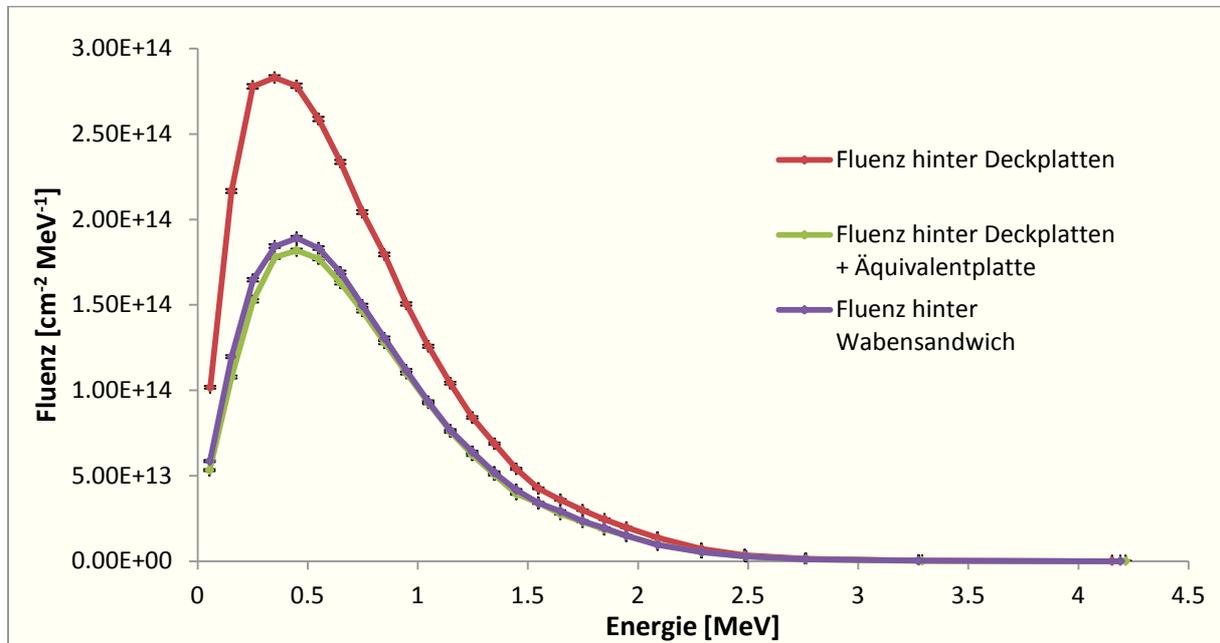


Abbildung 30: Die differenziellen Elektronenfluenzen hinter den jeweiligen Anordnungen nach Bestrahlung mit den Van-Allen-Elektronen.

Das Ergebnis bestätigt also im Wesentlichen die Ergebnisse der Protonenfluenz- und Dosismessungen, wobei der hohe Überschuss der Deckplattenanordnung auffällt. Dieser resultiert aus der Energieverteilung des Eingangsspektrums, dessen steiler Abfall schon bei kleinen Abschirmmassezuwächsen zu einer starken Elektronenreduktion hinter der Anordnung führt, wie es bei dem Wabensandwich und der Äquivalentplatte beobachtet werden kann.

4.4.2.3 Jupiterelektronen

Die Besonderheit des Jupiterelektronenspektrums ist, dass im Gegensatz zu den Van-Allen-Elektronen wesentlich höhere Energien auftreten. Dies wirkt sich auch auf die Sekundärteilchenproduktion aus. Aufgrund kleiner Wirkungsquerschnitte sind dabei Protonen und Neutronen zu vernachlässigen, wohingegen Photonen in Form von Bremsstrahlung in großer Zahl erzeugt werden. Das Spektrum der γ -Fluenz (siehe Abbildung 31) zeigt wie bei den "irdischen" Elektronen hinter den Deckplatten ein früheres Maximum als die anderen beiden Anordnungen, was auch hier auf die fehlende Masse zwischen den Deckplatten zurückzuführen ist. Dieses Maximum ist hier aber im Gegensatz zum Van-Allen-Elektronenspektrum niedriger, weil der Anteil von Photonen, die in den Waben bzw. der Ersatzplatte erzeugt werden, durch die höheren Elektronenenergien höher liegt. Die Platten- und die Wabenkonstruktion liefern ein im Wesentlichen deckungsgleiches Ergebnis. Die Äquivalentplatte sorgt für eine etwa 1% höhere Photonenfluenz.

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

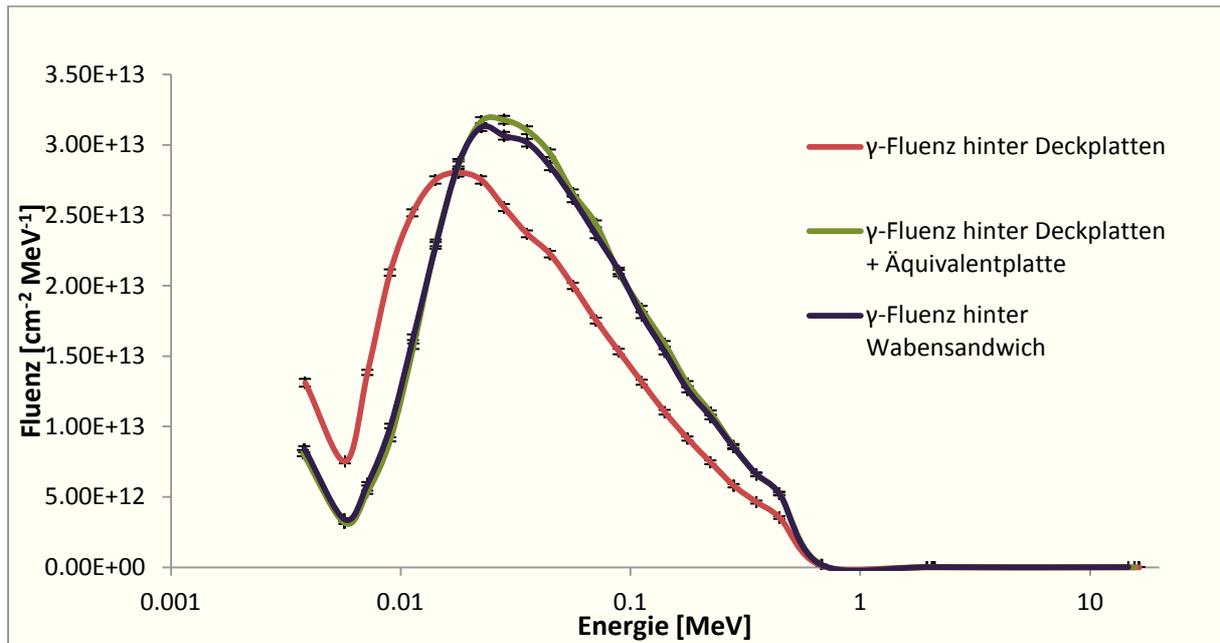


Abbildung 31: Die differenzielle Fluenz von Photonen hinter der jeweiligen Anordnung nach Bestrahlung mit Jupiterelektronen.

Die Elektronenfluenz hinter den Anordnungen (siehe dazu Abbildung 32) ist bei der Deckplattenanordnung unter 2 MeV um fast 50% gegenüber der mit der Äquivalentplatte erhöht. Auch die Wabenanordnung passieren insgesamt 3,5% mehr Elektronen als die Plattenkonstruktion. Die Ergebnisse decken sich mit denen der Elektronen aus dem GEO-Orbit (Abbildung 30, man beachte auch die unterschiedlichen Skalen) und sind auch auf dieselben Ursachen zurückzuführen.

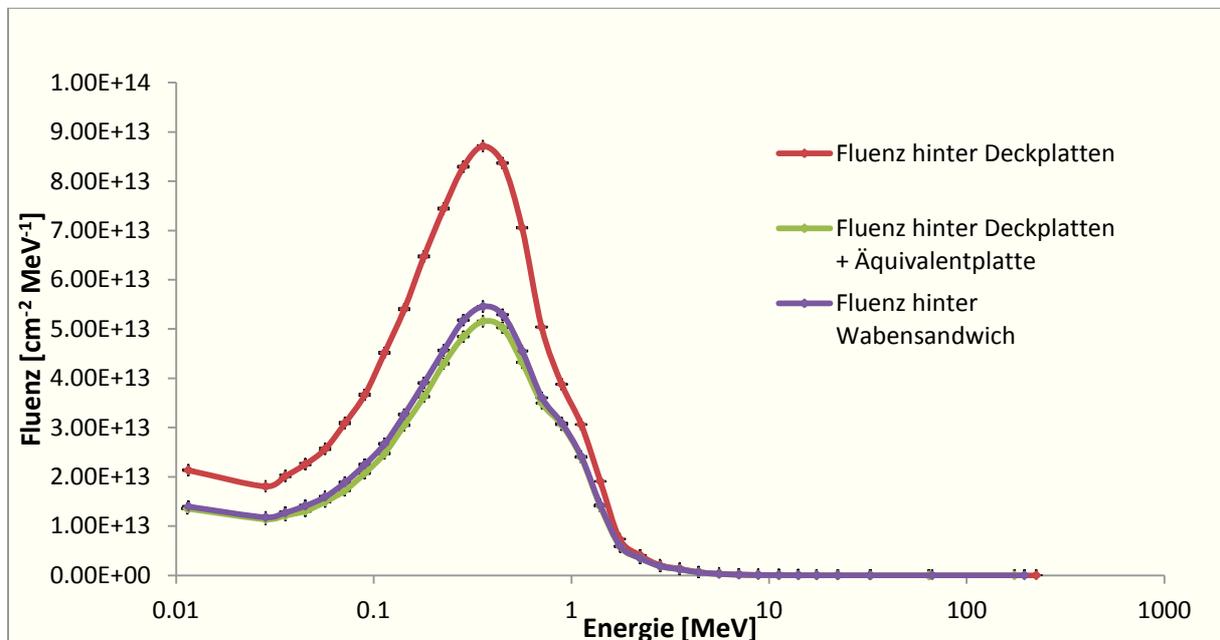


Abbildung 32: Die differenziellen Elektronenfluenzen hinter den jeweiligen Anordnungen nach Bestrahlung mit den Jupiterelektronen.

4.4.3 Der Beitrag einzelner Winkel

Zur Untersuchung des Abschirmverhaltens der Anordnung mit den Wabenstrukturen und der mit der Äquivalentplatte sind die Dosisanteile verschiedener Einfallswinkel untersucht worden. Die zugehörigen Ergebnisse sind in den Graphen auf Abbildung 33 und Abbildung 34 aufgetragen sowie im Anhang B tabellarisch erfasst.

4.4.3.1 Solare Protonen

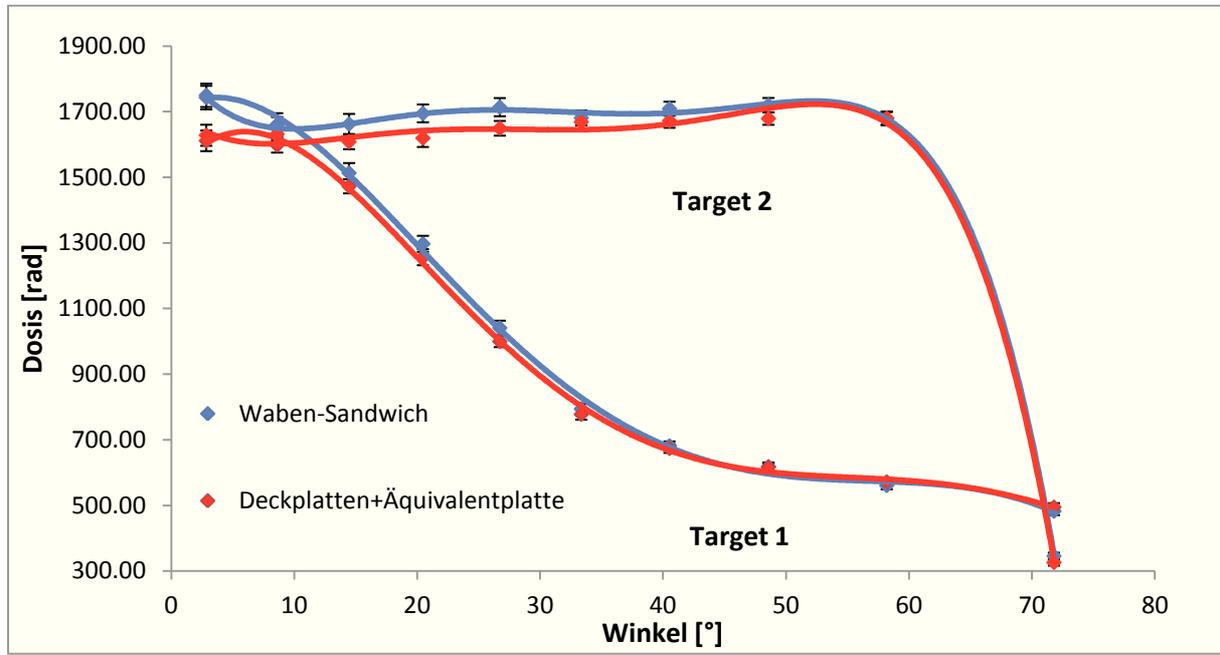


Abbildung 33: Die durch solare Protonen deponierten Dosen für beide Konfigurationen.

Die winkelabhängigen Dosen der solaren Protonen ergeben für Target 1 einen Verlauf, der für beide Konfigurationen mit Ausnahme der ersten zwei Winkel ($2,87^\circ$ und $8,63^\circ$) innerhalb des Fehlers übereinstimmt. Die ersten beiden Werte liegen bei der Wabenstruktur um 7,9% und 3,8% über denen der Ersatzkonstruktion. Die zwei Wendepunkte der Kurve von Target 1 zwischen 8 und 15° und etwa 40° ergeben sich aus dessen geometrischer Lage. So erreichen bis zu einem Einfallswinkel von rechnerisch $8,5^\circ$ unter Annahme vollständig geradliniger Ausbreitung genauso viele Teilchen Target 1 wie das mittig auf der Platte angeordnete Target 2. Diese Annahme bestätigt auch der Blick auf die jeweiligen statistischen Fehler, die durch eine höhere Anzahl an Teilchen im Target abnehmen. Zwischen $8,5^\circ$ und 33° nimmt dann die Fläche der Quelle, von der aus Teilchen ohne Ablenkung Target 1 erreichen können verhältnismäßig stark ab, was sich im Verlauf der gemessenen Dosis widerspiegelt. Über 33° verhält sich die Größe dieser Fläche (und damit die Teilchenzahl) dann etwa so wie Target 2, was sich in der langsamer abnehmenden Dosis zeigt.

Bei den Dosen in Target 2 ist die Übereinstimmung der beiden Konfigurationen im Wesentlichen auch gegeben. Keine Übereinstimmung innerhalb des statistischen Fehlers haben die beiden Konfigurationen für die Winkel $2,87^\circ$, $20,49^\circ$ und $26,74^\circ$, wo jeweils die Äquivalentplattenkonfiguration etwas geringere Dosiswerte liefert. Der klare Abfall beim Wert $71,81^\circ$ lässt sich eindeutig der geometrischen Anordnung zuschreiben. Die trotz Schwankungen im Allgemeinen bis zum Winkel $58,21^\circ$ konstante Dosis kann damit erklärt werden, dass sich

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

zwei gegenteilig wirkende Effekte nahezu vollständig aufheben. So sinkt unter Annahme geradliniger Ausbreitung zwar mit zunehmendem Einfallswinkel die Zahl der Protonen, die die Anordnung passiert, weil sich die Weglänge durch die Deckplatte um den Faktor $1/\cos \theta$ verlängert, gleichzeitig steigt aber durch die schräger einfallenden Teilchen deren Weglänge im Target, wodurch dort pro Proton entsprechend mehr Energie deponiert wird.

Aus der Winkelanalyse wird deutlich, dass die leicht erhöhte Gesamtdosis bei der Wabenanordnung gegenüber der Äquivalentplatte bei Protonen vor allem durch fast senkrecht einfallende Teilchen verursacht wird, von denen einige die Waben ohne Energieverlust passieren können. Für den Großteil der Einfallswinkel ab etwa 10° ergeben sich dagegen keine signifikanten Unterschiede.

4.4.3.2 Van-Allen-Elektronen

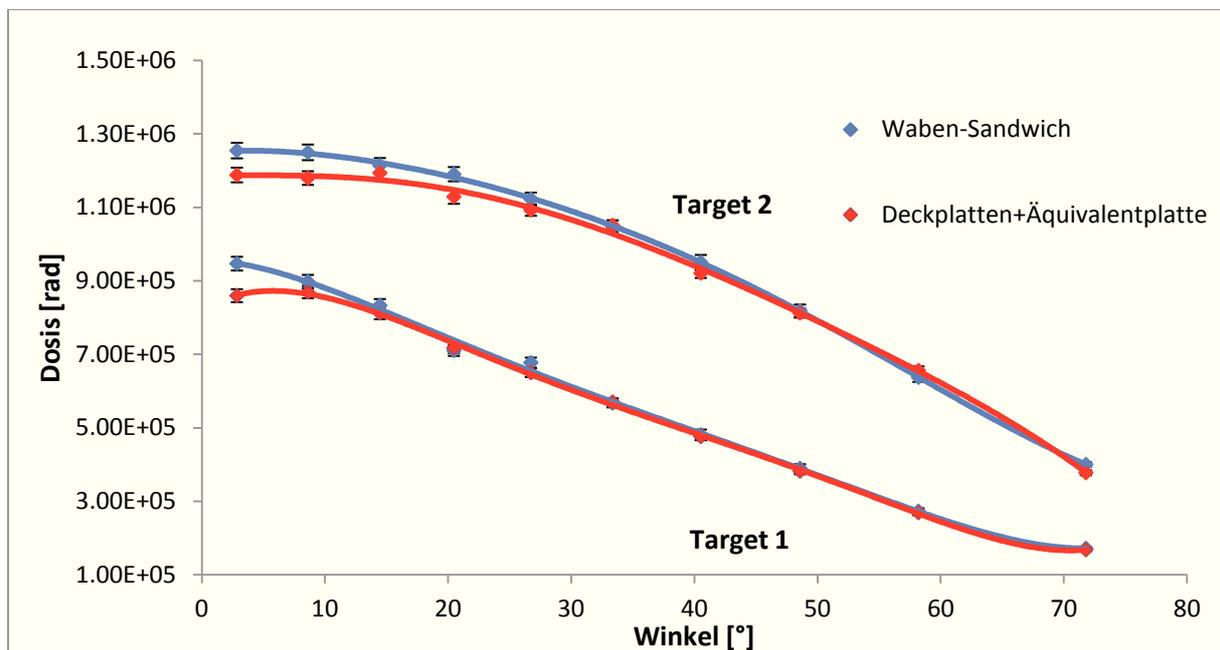


Abbildung 34: Die durch Van-Allen-Elektronen deponierten Dosen für beide Konfigurationen.

Die Dosen durch Van-Allen-Elektronen sind ähnlich wie bei den solaren Protonen für kleine Winkel für die Wabenstruktur etwas höher, während sie bei größeren Winkeln sehr gut übereinstimmen. Bei Target 1 weichen nur der erste Wert und sowie der bei $26,74^\circ$ über den statistischen Fehler hinaus voneinander ab, wobei nur der erste Wert mit 9,2% deutlich höher liegt. Ansonsten stimmen beide Konfigurationen gut miteinander überein und fallen gleichermaßen näherungsweise linear ab. Ein Abfallen ist bei Target 2 auch zu beobachten, wobei sich dieses ab etwa 30° etwas beschleunigt. Drei der ersten vier Werte der Wabenanordnung weisen höhere Dosen auf, während der Rest im Rahmen der Fehler gut übereinstimmt.

Ähnlich wie bei den Protonen entsteht die hauptsächliche Abweichung auch hier durch kleine Winkel, unter denen die Teilchen leichter die Wabenstruktur durchdringen können. Sonstige geometrische Einflüsse wie bei den Protonen fallen in den Kurven aber nicht auf, was in der wesentlich höheren Ablenkbarkeit der Elektronen ihre Ursache hat. So geht die Richtungsinformation beim Durchdringen weitgehend verloren, weshalb auch Target 2 anders als bei den Protonen durchgehend höher belastet ist als Target 1.

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

4.4.4 Analyse der Weglänge der Teilchen durch die Wabenstruktur

Eine Analyse der absoluten Pfadlängen, d.h. der integrierten Gesamtwege aller Teilchen durch die Wabenstruktur und im Vergleich dazu durch die Konfiguration mit der Äquivalentplatte ergibt die in Tabelle 12 eingetragenen Werte.

Tabelle 12: Die absoluten Pfadlängen von Elektronen und Protonen durch die Wabenstruktur sowie die Vergleichsstruktur mit Äquivalentplatte.

Konfiguration	Spektrum	Pfadlänge [mm]	Fehler [mm]	Fehler in %
Deckplatten + Äquivalentplatte	Sol. p ⁺	1.64E+12	1.29E+10	0.79%
	Van-Allen-e ⁻	2.17E+16	2.12E+14	0.98%
	Jupiter-e ⁻	5.64E+15	1.42E+13	0.25%
Waben-Sandwichplatte	Sol. p ⁺	1.60E+12	1.50E+10	0.93%
	Van-Allen-e ⁻	1.95E+16	1.88E+14	0.97%
	Jupiter-e ⁻	5.21E+15	1.24E+13	0.24%

Demnach ist die insgesamt von allen Teilchen zurückgelegte Pfadlänge durch die Äquivalentplatte etwas höher als die durch die Wabenstruktur – bei Protonen ist sie 2,5% länger, bei den Elektronen sogar 11,3% und 8,3%. Demnach verlieren diese dort auch etwas mehr Energie, was sich mit den Dosis- und Fluenzbetrachtungen deckt.

4.4.5 Sektoranalyse der Versuchsanordnung

Mit dem Geant4-basierten Sektoranalyseprogramm SSAT [65] (siehe auch Abschnitt 2.5.1.3) wurde die Anordnung vom mittigen Target 2 aus auf ihre Abschirmungsanordnung hin untersucht. Der Raumwinkelanteil an bestimmten Abschirmdicken von den beiden Anordnungen ist in Abbildung 35 zu sehen. Dabei wird nochmals der bereits diskutierte Umstand deutlich, dass ein bestimmter Teil des Raumwinkels zwischen den Waben im Gegensatz zur Äquivalentplattengeometrie keinerlei Abschirmung zwischen den Deckplatten bietet. Dort besteht die Abschirmung nur aus den Deckplatten, was 0,131 g/cm² Abschirmmasse entspricht. Diese Minimalabschirmung gilt aber nur für einen Raumwinkelanteil von 0,7% des betrachteten Kugelausschnitts von etwa 71°x73°. Bei der Äquivalentplattenanordnung dagegen beträgt die Mindestabschirmung 0,181 g/cm², die die Platten je nach Durchquerungswinkel bieten. Diese beiden Minimalabschirmungen stellen im Graphen den Beginn des jeweiligen Wertebereichs dar. Die Verteilung der Platte ist dergestalt, dass der Großteil des Raumwinkels minimale Abschirmung bietet, und der Anteil für höhere Dicken dann kontinuierlich abfällt. Bei der Wabanordnung ist das Bild wesentlich heterogener. Dort ist der Großteil zwar ähnlich wie bei der Platte abgeschirmt, es gibt aber geringe Anteile, die sehr hohe Werte aufweisen, weil sie die Waben auf langem Weg durchqueren.

Insgesamt liegt die mittlere Abschirmung bei der Ersatzkonstruktion durchschnittlich um 0,7% über der der Wabanordnung. Die mit SSAT in Verbindung mit einer für das Missionsszenario mit SHIELDOSE2 [61] ermittelten Tiefendosis Kurve errechnete Dosis liegt für die Waben bei 12,7 MRad und für die Platte bei 11,8 MRad. Hier zeigt sich also ein um etwa 7% erhöhter Wert, was auf das Eingangsspektrum und den Gradienten der Tiefendosis Kurve sowie die Verteilung der Abschirmung zurückzuführen ist.

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

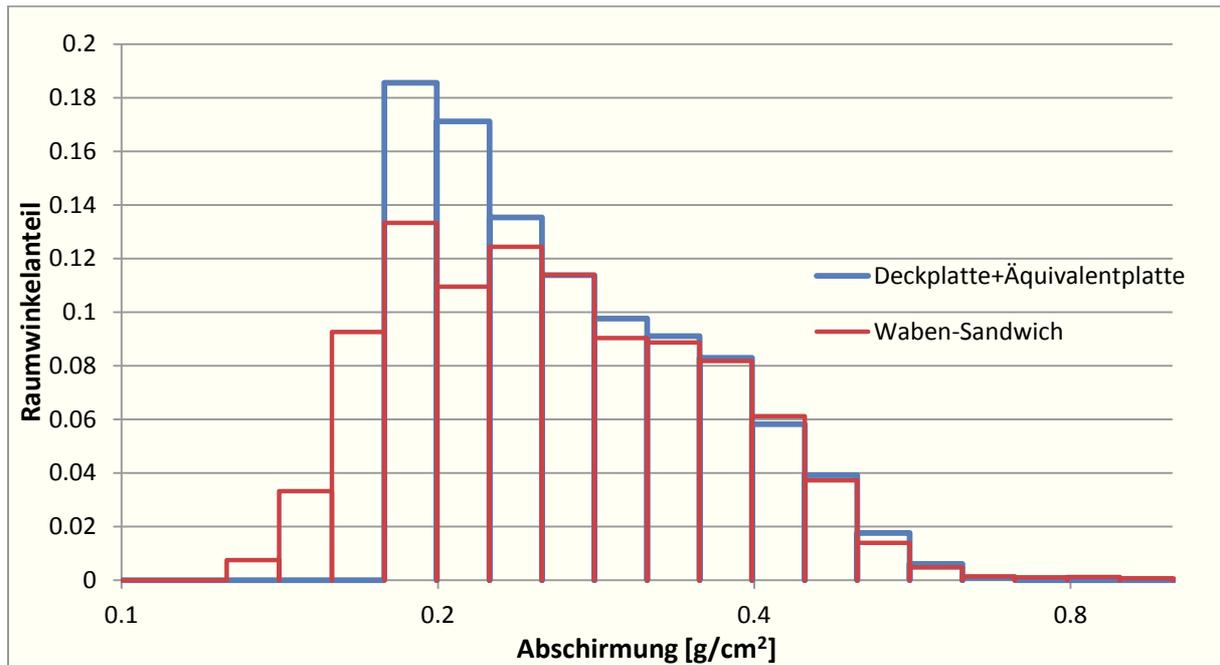


Abbildung 35: Raumwinkelanteil von verschiedenen Abschirmdicken berechnet mit SSAT für die Position von Target 2. Die jeweilige Intervallgröße wächst exponentiell.

4.5 Wabensandwichstrukturen in dreidimensionaler Betrachtung

Es wurden weitere Rechnungen mit GRAS mit dreidimensionalen würfelförmigen Körpern durchgeführt [87], um die Gültigkeit der Methode für reale Satelliten zu untermauern. Dabei kamen ebenfalls Teilchenspektren zum Einsatz, die in einem geostationären Orbit auftreten. Das geometrische Modell entsprach hier einem Rahmengerüst aus Aluminium, in das in die sechs Seitenflächen jeweils quadratische Platten des hier verwendeten Musters eingefügt sind (siehe Abbildung 36). Auch die Wabenkonfiguration und die untersuchte Ersatzkonstruktion entsprechen in den Abmaßen denen der obenstehenden Untersuchung.

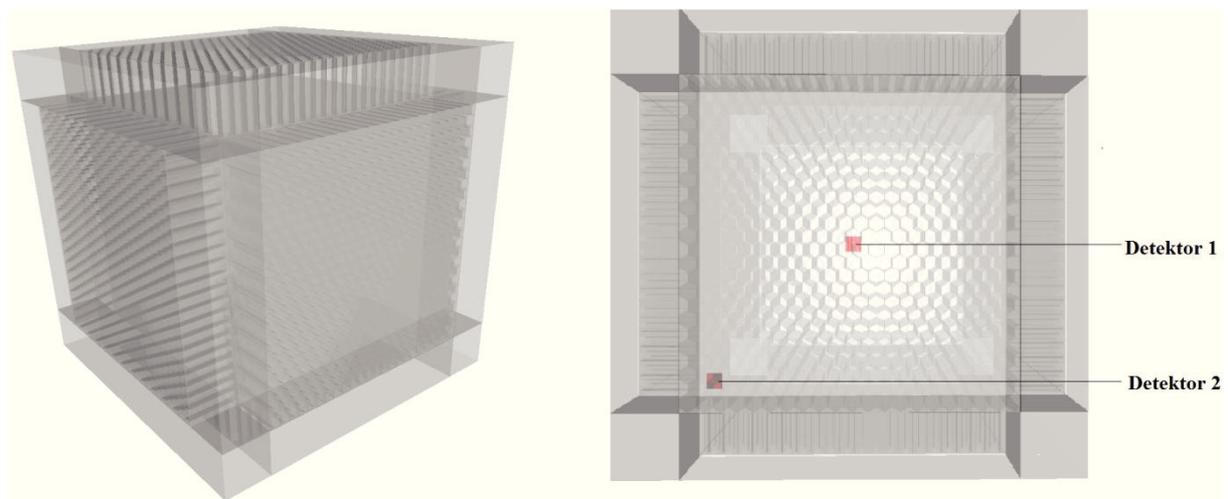


Abbildung 36: Das dreidimensionale Modell aus [87] in der Schrägansicht (linke Seite) und von der Seite mit dem beiden Detektoren (rechte Seite), in denen die Dosis gemessen wurde.

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

Tabelle 13: Abweichungen von Wabenstruktur zu Plattenersatzkonstruktion in drei Dimensionen [87].

Simulierte Teilchen	Gemessene Größe	Abweichung	Δ Abweichung
sol. Protonen	Protonenfluenz	0,46%	0,19%
	Energiedosis Detektor 1	0,45%	1,74%
	Energiedosis Detektor 2	1,78%	2,05%
Elektronen	Elektronenfluenz	6,74%	0,13%
	Gammafluenz	0,24%	0,41%
	Energiedosis Detektor 1	4,95%	0,93%
	Energiedosis Detektor 2	9,13%	1,08%

Wie aus den Ergebnissen dieser Arbeit in Tabelle 13 hervorgeht, liegen auch im dreidimensionalen Fall die Abweichungen (definiert wie in Gleichung (15)) der Äquivalentplattenkonstruktion zur Wabenstruktur im einstelligen Bereich. Dadurch ist gezeigt, dass die hier vorgestellte Vorgehensweise grundsätzlich auch für dreidimensionale Modelle angewendet werden kann.

4.6 Bewertung der Ergebnisse

Um eine abschließende Bewertung vornehmen zu können, sind die Abweichungen (nach Gleichung (15)) aller Ergebnisse der Ersatzkonstruktion von der Wabenstruktur in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Überblick über die Abweichungen der Ergebnisse von der Äquivalentplattenkonstruktion zur Wabenstruktur.

Teilchenspektrum	Größe	Abweichung in %	Fehler der Abweichung
Sol. Protonen (GEO)	Dosis Target 1	3.55%	1.94%
	Dosis Target 2	0.99%	1.44%
	Integrierte Protonenfluenz	1.02%	1.88%
	Pfadlänge	-2.50%	1.25%
Van-Allen-Elektronen (GEO)	Dosis Target 1	4.97%	1.90%
	Dosis Target 2	-0.81%	1.49%
	Integrierte Elektronenfluenz	3.77%	1.12%
	Integrierte Gammafluenz	0.29%	2.48%
	Pfadlänge	-11.28%	1.53%
Jupiterelektronen (JUICE)	Dosis Target 1	2.37%	1.39%
	Dosis Target 2	1.59%	1.03%
	Integrierte Elektronenfluenz	3.41%	0.42%
	Integrierte Gammafluenz	-0.99%	1.83%
	Pfadlänge	-8.27%	0.38%
Sektoranalyse mit SSAT	Mittlere Abschirmung Target 2	-0.68%	0.44%
	Gesamtdosis Target 2	7.01%	0.26%

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

Es fällt sofort auf, dass alle für die Strahlenbelastung wichtigen Größen (also Dosis und Fluenz) eine Abweichung von lediglich 0 bis 5% haben. Der durch die Sektoranalyse ermittelte Dosiswert liegt zwar etwas darüber, ist aber durch die größere inhärente methodische Ungenauigkeit dieser Herangehensweise (siehe auch Kapitel 5) erklärbar. Bei allen Dosis- und Fluenzwerten bis auf zwei (Dosis Target 2 Van-Allen-Elektronen und gesamte Gammafluenz durch Jupiterelektronen) liegen die Belastungen der Wabenstruktur über denen der Ersatzkonstruktion. Außerdem auffällig ist, dass für Target 1 die Dosisabweichungen stets deutlich höher als die in Target 2 sind. Die Erklärung dafür ist, dass für das am Rand liegende Target 1 der Dosisanteil an der Gesamtdosis durch Teilchen mit kleinem Einfallswinkel erheblich höher liegt als für das mittige Target 2. Dies führt dazu, dass dort die Abschirmung durch die Waben teilweise wegfällt, was sich dann dem höheren Anteil entsprechend stärker auswirkt.

Deutlich höhere Abweichungen von etwa 8 und 11% gibt es für die Elektronen bei den Pfadlängen, wobei diese bei der Äquivalentplattenkonfiguration länger sind. Längere Wegstrecke bedeutet für Elektronen zwar, dass sie entsprechend stärker abgebremst werden, aber auch dementsprechend mehr Bremsstrahlung erzeugen. Deswegen können aus den Pfadlängen keine direkten Rückschlüsse über die Strahlenbelastung gezogen werden.

4.7 Fazit und Empfehlung

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lässt sich nun die Schlussfolgerung ziehen, dass man die Wabenstruktur zur Vereinfachung als Platte modellieren kann, aber die Belastungsgrößen bei hundertprozentiger Verwertung der Wabenmasse etwas unterschätzt. Da die Abweichung im extremsten Fall bei knapp 5%, sonst aber immer deutlich unter 5% lag, und die Belastung bei den üblichen Teilchenspektren zu kleineren Abschirmungen hin stärker als linear ansteigt, lautet die Empfehlung, 95% der Gesamtabschirmmasse der Wabenstruktur zu verwenden. Da hier aber auch die Deckplatten einbezogen werden müssen ergibt, sich folgender Zusammenhang für die Massenbelegungsdicken d :

$$\begin{aligned}d_{\text{Gesamt}} &= 2 \cdot d_{\text{Deckplatte}} + d_{\text{Äquivalentplatte}} \\0,95 \cdot d_{\text{Gesamt}} &= 2 \cdot d_{\text{Deckplatte}} + d_{\text{Ersatzplatte}} \\d_{\text{Ersatzplatte}} &= 0,95 \cdot d_{\text{Äquivalentplatte}} - 0,1 \cdot d_{\text{Deckplatte}}\end{aligned}\tag{17}$$

Im hier untersuchten konkreten Fall ergibt sich, dass für die Ersatzplatte, die die Wabenstruktur ersetzt, 82% der vorhandenen Wabenmasse (entsprechend 0,1539 mm Leg.5056 eq.) verwendet werden können.

Zur Validierung dieser These wurden die Dosismessungen in beiden Targets für eine Platte mit 82% der ursprünglichen Masse (entspricht Masse der Waben) durchgeführt. Die Abweichungen sind in Tabelle 15 aufgetragen.

4. Die Abschirmungswirkung von Wabenkern-Sandwichplatten

Tabelle 15: Die Abweichungen der Empfehlungsplatte mit 82% der ursprünglichen Wabenmasse vom Wabenkernsandwich.

Teilchenspektrum	Größe	Abweichung in %	Unsicherheit der Abweichung
Sol. Protonen (GEO)	Dosis Target 1	-1.60%	2.03%
	Dosis Target 2	-3.16%	1.49%
Van-Allen-Elektronen (GEO)	Dosis Target 1	-0.72%	1.98%
	Dosis Target 2	-4.95%	1.52%
Jupiterelektronen (JUICE)	Dosis Target 1	-4.69%	1.47%
	Dosis Target 2	-4.30%	1.07%

Die Validierung zeigt, dass alle Dosiswerte des tatsächlichen Wabenkernsandwichs unter denen der Empfehlungsplattenanordnung liegen, wobei die Werte des Targets 1 im GEO innerhalb des statistischen Fehlers übereinstimmen. Daraus folgt, dass die komplexe Wabenstruktur zwischen zwei Deckplatten bei einem Wabenkernsandwich durch eine Platte des Wabenkernmaterials ersetzt werden kann, die der Dicke in Formel (17) entspricht.

Der Geltungsbereich dieser Regel umfasst alle Wabenkernsandwiches mit vergleichbaren Abmessungen zu den hier untersuchten. Eine Veränderung der Zellgröße wirkt sich auch auf die Masse der Waben und damit direkt auf die Ersatzplatte aus, so dass auch mit veränderter Zellgröße sehr ähnliche Resultate zu erwarten sind. Dasselbe gilt für ein unterschiedliches Wabenmaterial, das ebenfalls beim Design der Ersatzplatte einfach berücksichtigt werden kann, indem man die Ersatzplatte daraus modelliert. Wie in Abschnitt 4.4.1.2 gezeigt wurde, sind auch bei größeren und kleineren Gesamtdicken der Sandwiches keine wesentlich stärkeren Abweichungen von der Plattenanordnung zu sehen, woraus folgt, dass auch hier die Regel angewandt werden kann.

5 Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Für die Analyse von Dosisbelastungen durch (kosmische) Strahlung existieren im Wesentlichen zwei Verfahren. Die die Realität simulierende Monte-Carlo-Methode (siehe 2.5.2) sowie die eher abschätzende Sektoranalyse (siehe 2.5.1) unter Einbeziehung einer Tiefendosiskurve. Es hat sich gezeigt, dass die Sektoranalyse nicht immer verlässliche Ergebnisse liefert [88]. Gerade bei komplexeren, d.h. detaillierteren Modellen mit höherer Anzahl an Volumina, Materialien und Formen weichen die Ergebnisse teilweise um fast eine Größenordnung von der zuverlässigen Monte-Carlo-Methode [68] ab. Das Zustandekommen und Verhalten dieser Abweichung wird im folgenden Kapitel untersucht.

5.1 Abweichungen bei berechneten Dosen durch unterschiedliche Verfahren

Eine Beschreibung der Abweichung von mit Sektoranalyse in Verbindung mit SHIELDDOSE-2 errechneten Dosen von denen mit Monte-Carlo-Simulationen gewonnenen Werten findet sich bei Lindberg et al. [89]. In dieser Arbeit wurden verschiedene einfache Anordnungen (Platte, Kugel und Box) mit verschiedenen Dicken sowie ein komplexes, detailliertes Modell des Satelliten ConeXpress, das etwa 100 Volumina umfasste, untersucht. Das verwendete Spektrum entsprach dabei dem der realen ConeXpress-Mission, die im Wesentlichen in einem geostationären Orbit stattfindet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit ergeben folgendes Gesamtbild:

- die Übereinstimmung der Ergebnisse beider Methoden ist bei Protonen erheblich besser als bei Elektronen;
- bei einfachen geometrischen Modellen ist die Übereinstimmung i.A. etwas besser und meist akzeptabel;
- die Kugelgeometrie bietet eine höhere Übereinstimmung als ein Würfel;
- beim komplexen Satellitenmodell weichen die Ergebnisse abhängig von der Position der Messung teilweise extrem (bis zu Faktor 9) ab.

Die extreme Abweichung durch die Sektoranalyse, deren Werte in dieser Studie alle deutlich über den Monte-Carlo-Resultaten lagen, wirft die Frage auf, wie diese Abweichungen zu Stande kommen und welche Parameter der verwendeten Modelle diese Abweichung verursachen.

5.2 Versuchsanordnung der Simulationen

Die im Folgenden aufgeführten Versuchsanordnungen wurden hinsichtlich Ihrer Komplexität ausgewählt, wobei auf realitätsnahe Konfigurationen Wert gelegt wurde. Die Volumenzahl

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

steigt mit zunehmender Komplexität an. Die anderen die Komplexität erhöhenden Parameter sind hier die Anzahl an Materialien und geometrischen Formen und werden für verschiedene Volumenzahlen variiert, um den jeweiligen Einfluss auf die Ergebnisse einschätzen zu können.

5.2.1 Targets

Um die beiden Verfahren vergleichen zu können, muss die Dosis gemessen werden. Dies geschieht bei der Sektoranalyse quasi punktförmig, bei der Monte-Carlo-Simulation aber durch direkte Messung in einem Detektorvolumen, dem Target. Nun stellt sich die Frage, welche Ausmaße dieses Target für die Vergleichsmessung haben soll. Dabei ergibt sich ein Zielkonflikt: kleinere Targets ergeben höhere Dosen, da sich der Körper weniger "selbstabschirmt", detektieren aber möglicherweise zu wenige Teilchen der Simulation, was die Statistik verschlechtert und übermäßig lange Rechenzeiten erfordert.

Als Lösung wurden in den Messungen quaderförmige Targets aus dem gängigen Halbleitermaterial Silizium verwendet, die bei einer flächigen an die Größe des Gesamtmodells angepassten Ausdehnung (siehe dazu Abbildung 37) eine Höhe von lediglich 0,01 mm aufweisen. Dies ist ein Kompromiss aus den Erfordernissen des Modells und einem möglichst realitätsgetreuen Anwendungsfall, wo sensitive Volumen oft als Dünnschichten beispielsweise in Halbleiterbauteilen vorliegen.

In der Sektoranalyse mit SSAT bleiben die Targets als physikalische Körper im geometrischen Modell bestehen. Die Dosis wird an ihrem geometrischen Mittelpunkt gemessen, d.h. ein (minimaler) Abschirmungseffekt durch den Körper selbst wird berücksichtigt.

5.2.2 Einfache Körper

Um die Auswirkungen zunehmender Komplexität auf die Qualität der Ergebnisse zu überprüfen wurden zunächst Körper minimaler Komplexität untersucht. Diese sind hohl und haben die Form einer Kugel, eines Würfels und eines Zylinders. Variiert wurden dabei das Material, die Größe und die Wandstärke um die in Abbildung 37 gezeigten Parameter.

Als Materialien wurden Aluminium und Blei ausgewählt, um einen Vertreter niedriger und einen hoher Kernladungszahl zu untersuchen. Zudem geht die in der Sektoranalyse verwendete Tiefendosiskurve von Aluminium als Abschirmmaterial aus. Des Weiteren wurden zwei verschiedene Größen (Durchmesser bei der Kugel, Kantenlänge beim Würfel, Höhe und Durchmesser beim Zylinder) mit zwei bzw. drei verschiedenen Wandstärken untersucht. Die Größe des Siliziumtargets ist jeweils den Gesamtabmessungen angepasst.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

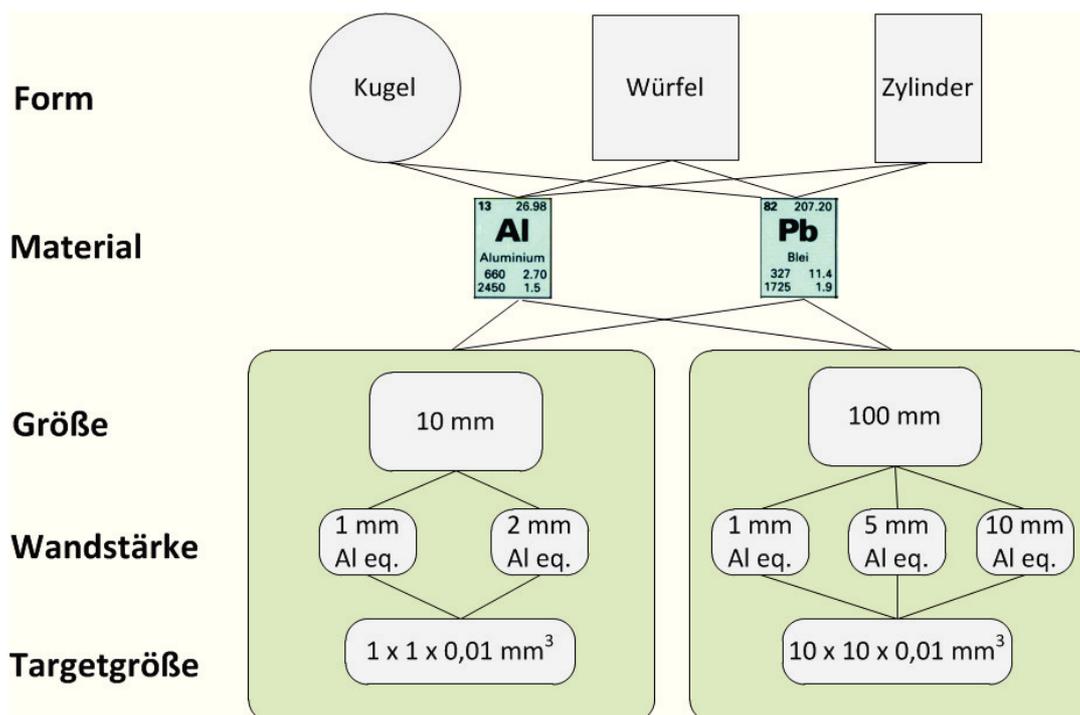


Abbildung 37: Die untersuchten einfachen Körper mit den unterschiedlichen Parametern.

5.2.3 Satellitenmodell mit 10 Volumina verschiedener Komplexität

Als nächste Stufe wird die Anzahl der Volumina auf zehn erhöht. Als Basis dient ein einfaches Satellitenmodell mit je zwei Solarpaneelen und Kugeltanks sowie Parabolantenne, Schubdüse, Gesamtstruktur und Instrumentenboxen. Dieses ist aus (ohne Target) fünf verschiedenen geometrischen Formen (Kugel, Quader, Zylinder, Kegelstumpf und Paraboloid) in fünf unterschiedlichen Materialien (Aluminium, Kohlenstoff, Kapton/Polyimid, Galliumarsenid und Eisen) zusammengesetzt. Die Komplexität des Modells bezüglich der Anzahl der Materialien bzw. geometrischen Formen wird dann in diskreten Schritten auf drei bzw. eins reduziert. Eine Matrix der Formen und Materialien ist in Tabelle 16 zu sehen.

Tabelle 16: Zusammensetzung der neun unterschiedlich komplexen Satellitenmodelle mit jeweils 10 Volumina.

Materialien		1	3	5
Formen				
1	Al		Al, C, GaAs	Al, C, GaAs, Kapton, Fe
	Box		Box	Box
3	Al		Al, C, GaAs	Al, C, GaAs, Kapton, Fe
	Box, Zylinder, Kugel		Box, Zylinder, Kugel	Box, Zylinder, Kugel
5	Al		Al, C, GaAs	Al, C, GaAs, Kapton, Fe
	Box, Zylinder, Kugel, Kegelstumpf, Paraboloid		Box, Zylinder, Kugel, Kegelstumpf, Paraboloid	Box, Zylinder, Kugel, Kegelstumpf, Paraboloid

Mit jeder dieser neun Satellitenkonfigurationen wurde an vier verschiedenen Stellen (in der Mitte, an zwei verschiedenen Seiten, in der Ecke) mit einem Siliziumtarget (Abmessungen $100 \times 100 \times 0,01 \text{ mm}^3$) die Dosis gemessen. Die Positionen der Detektoren sind in der Darstellung des Modells in Abbildung 38 zu sehen. Es ist zu beachten, dass bei jeder der Mes-

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

sungen jeweils nur ein Detektorvolumen eingebaut war, d.h. diese sich nicht gegenseitig beeinflussen haben.

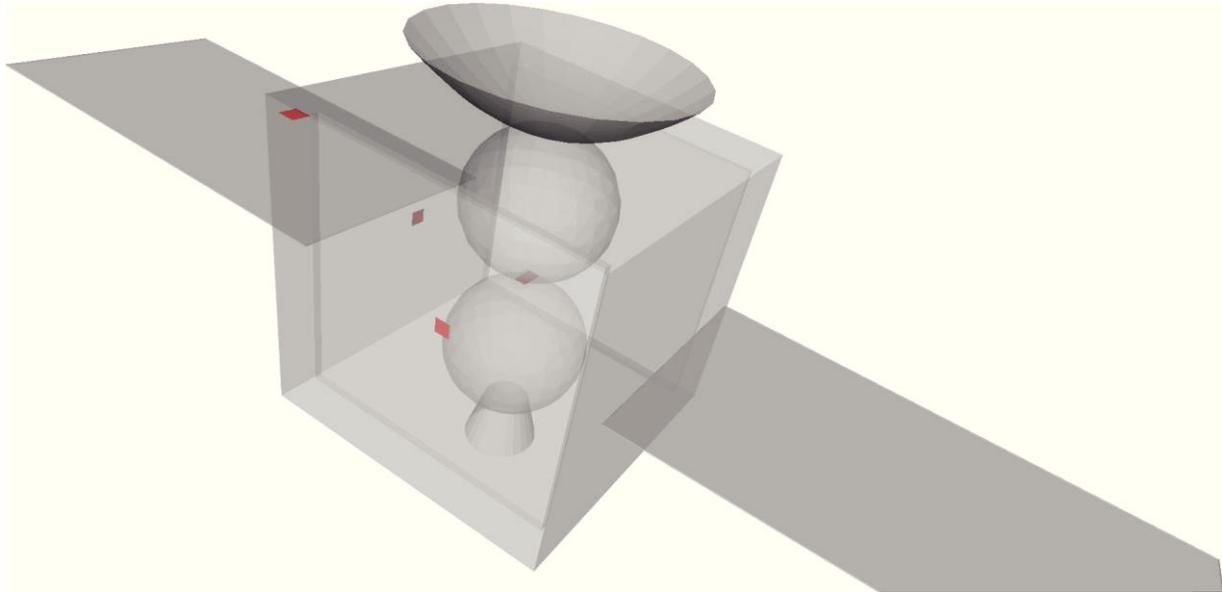


Abbildung 38: Das einfache Satellitenmodell mit zehn Volumina in der Konfiguration mit fünf verschiedenen geometrischen Formen. Die Detektoren sind hier in rot dargestellt.

5.2.4 Satellitenmodell mit 100 Volumina verschiedener Komplexität

Basierend auf dem Satelliten GPS Block IIR wurde ein vereinfachtes Modell erstellt, das 101 Volumina inklusive 17 Targets enthält, d.h. das jeweilige Targetvolumen „sieht“ immer 100 andere Volumen. Analog zum zehnvolumigen Modell wurden auch hier die Materialanzahl und die Formenzahl ausgehend vom komplexen Modell reduziert (siehe Tabelle 17). Anders als beim zehnvolumigen Modell sind hier alle Detektoren gleichzeitig im Modell, was die gleichzeitige Dosismessung in allen Volumen ermöglichte.

Tabelle 17: Zusammensetzung der neun unterschiedlich komplexen Satellitenmodelle mit jeweils 100 Volumina.

Materialien	2	5	9
Formen			
1	Al, Si	Al, Si, N2H4,CFK, GaAs	Al, Si, N2H4,CFK, GaAs, SiO2, Ni, Ti, Edelstahl
	Box	Box	Box
3	Al, Si	Al, Si, N2H4,CFK, GaAs	Al, Si, N2H4,CFK, GaAs, SiO2, Ni, Ti, Edelstahl
	Box, Zylinder, Kugel	Box, Zylinder, Kugel	Box, Zylinder, Kugel
9	Al, Si	Al, Si, N2H4,CFK, GaAs	Al, Si, N2H4,CFK, GaAs, SiO2, Ni, Ti, Edelstahl
	Box, Zylinder, Kugel, Kegelstumpf, Zylinderpyramide, Trichter, Prisma, Tank, Halbkugel	Box, Zylinder, Kugel, Kegelstumpf, Zylinderpyramide, Trichter, Prisma, Tank, Halbkugel	Box, Zylinder, Kugel, Kegelstumpf, Zylinderpyramide, Trichter, Prisma, Tank, Halbkugel

In diese neun Satellitenkonfigurationen wurden insgesamt 17 Siliziumtargets in Instrumentenboxen eingebaut, in denen jeweils die Dosis gemessen wurde. Die Positionen der Targets

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

befinden sich verteilt in den verschiedenen Bauteilgruppen. Das Satellitenmodell mit den Positionen der sensitiven Volumen ist in Abbildung 39 zu sehen.

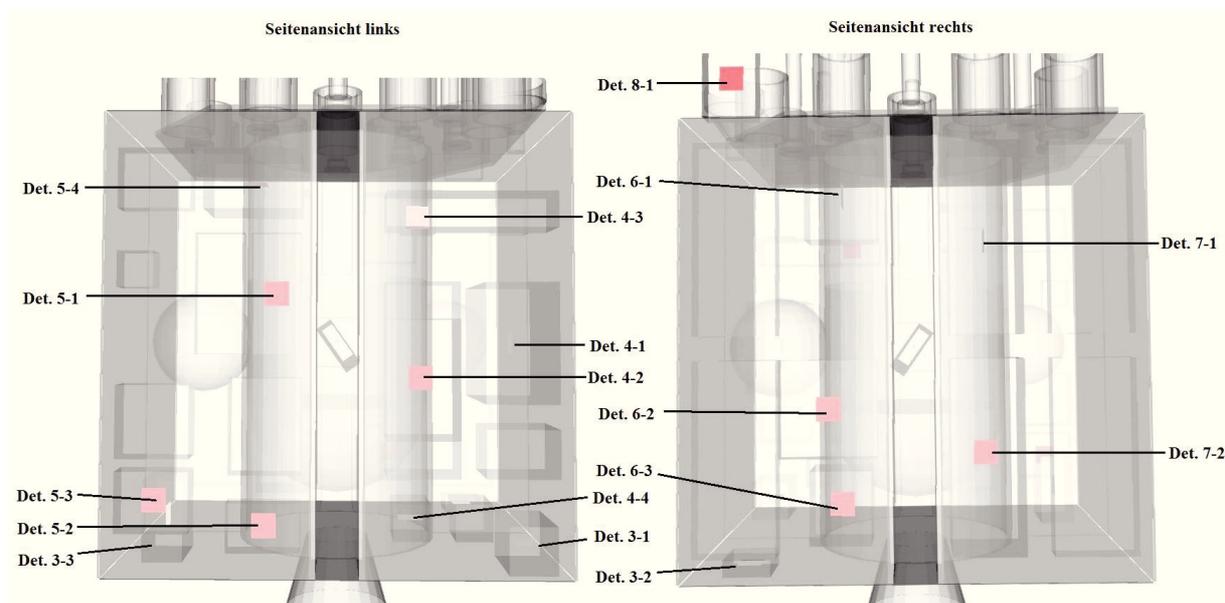


Abbildung 39: Das an den Satelliten GPS Block IIR angelehnte Satellitenmodell mit 100 Volumina in der Seitenansicht. Die Detektoren sind hier in rot dargestellt.

5.2.5 Satellitenmodell mit maximaler Komplexität

Aufbauend auf dem in Abschnitt 5.2.4 vorgestellten Modell mit 100 Volumina wurde der Satellit GPS Block II R mit weiteren Elementen erweitert, so dass er nun inklusive aller Teile 360 Volumen zählt. So besitzt dieses Modell nun zusätzlich zwei Yagiantennen, Reaktionsräder und eine weitere Instrumentenbox. Gravierendster Unterschied ist aber, dass einige repräsentative Instrumentenboxen nun mit Platinen ausgestattet wurden, auf denen sich standardisierte Chipbelegungen befinden. Diese Silizium-Elemente ersetzen die Detektorplättchen der bisherigen, einfacheren Modelle und kommen pro Belegung in vier verschiedenen Varianten vor (siehe Abbildung 40).

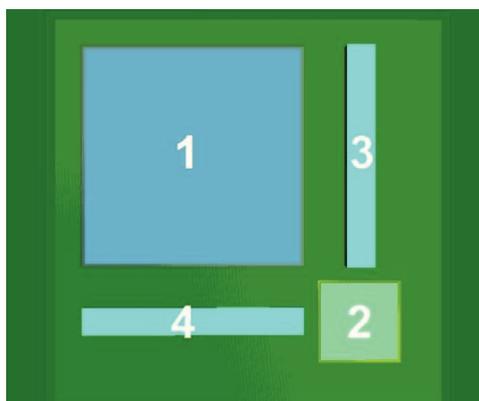


Abbildung 40: Die Standardbelegung der in den Instrumentenboxen verbauten Platinen mit vier verschiedenen Silizium-Elementen zur Messung der Dosis unter verschiedenen Umständen.

Dabei befindet sich das sensitive Detektorvolumen (78 mm x 78 mm x 1 mm) bei Bauteil 1 in einem 1 mm starken Polyethylengehäuse sowie unter einer 0,5 mm dicken Tantalabschirmung

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

und bei Bauteil 2 (28 mm x 28 mm x 1 mm) ebenfalls in einem Polyethylengehäuse, aber ohne Extraabschirmung. Die Bauteile 3 und 4 bestehen nur aus dem Detektorvolumen (Grundfläche 80 mm x 10 mm), wobei Bauteil 3 5 mm und Bauteil 4 1 mm dick ist. Platziert wurden insgesamt 22 dieser Standardbelegungen in sieben verschiedenen Instrumentenboxen mit unterschiedlichen, markanten Positionen. Zudem wurde ein Dosimeter auf der Oberseite des Satelliten angebracht. Dieses ist nach oben geöffnet und seitlich und unten durch 10 mm Blei abgeschirmt. Das Siliziumvolumen zur Messung der Dosis untergliedert sich in 18 aufeinanderliegende Schichten, wobei die äußeren zehn eine Dicke von 0,1 mm und die inneren acht eine Dicke von 0,5 mm aufweisen. Zu sehen sind diese Positionen sowie der komplette Satellit in Abbildung 41.

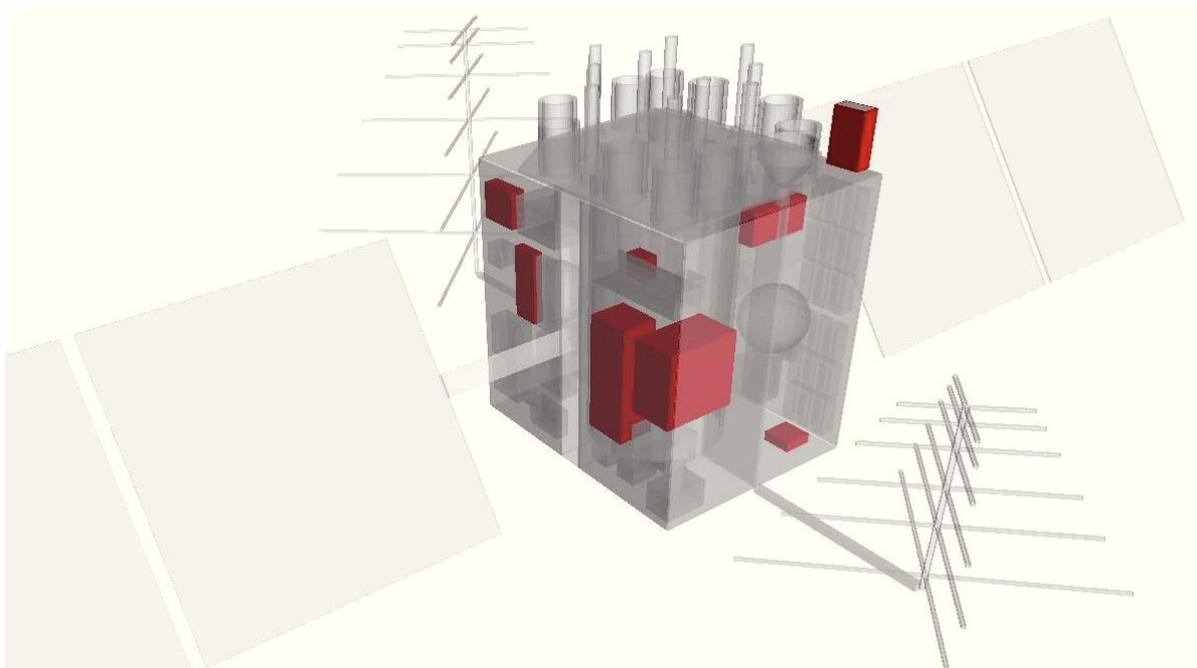


Abbildung 41: Der untersuchte Satellit mit maximaler Komplexität. Die Instrumentenboxen, in denen die Dosis gemessen wurde, sind wie das Dosimeter auf der Oberseite rot dargestellt.

5.2.6 Das verwendete Testspektrum

In den Simulationen wurden die Spektren für den geostationären Orbit aus Abschnitt 4.3.2 verwendet. Diese umfassen Van-Allen-Elektronen und solare Protonen, die bei einer Missionsdauer von zehn Jahren anfallen. Das Elektronenspektrum wurde wie in 4.3.2 unter 0,1 MeV abgeschnitten, das Protonenspektrum bei 5 bzw. bei den dicken Abschirmungen (10 mm Al eq.) der einfachen Körper bei 10 MeV. Die Protonen des Van-Allen-Gürtels wurden wegen ihrer niedrigen Energie im GEO nicht berücksichtigt.

5.2.7 Konfiguration der Simulationsprogramme

Die Einstellungen der Simulationssoftware sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 dargestellt. Details zu den Programmen sind in Abschnitt 2.5.2.4 bzw. 2.5.1.3 zu finden.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Tabelle 18: Die gewählten Einstellungen in den Monte-Carlo-Simulationen mit GRAS.

GRAS		
Bereich	Einstellung	Beschreibung
Physikalische Modelle	em_standard	Elektromagnetisches Modell
Physikalische Modelle	QGSP_BIC_HP, decay, binary_ion, gamma_nuc, stopping	Modelle zur Beschreibung hadronischer Physik
Cutlänge	0,1 mm	Produktionsschwelle, ab der Sekundärteilchen erzeugt werden
Startpunkt	autoSeed	Zufällige Auswahl der Startbedingungen

Tabelle 19: Die Einstellungen der Sektoranalyse mit SSAT.

SSAT		
Bereich	Einstellung	Beschreibung
Raumwinkelfenster $\theta \times \varphi$	$[0^\circ, 180^\circ] \times [0^\circ, 360^\circ]$	Untersuchung des vollen Raumwinkels
Intervallanzahl für θ, φ	36, 72	Aufteilung des Raumwinkels in 36x72 Segmente
Pfadlängenmethode	slant	Flächendichtemessung linear entlang der Ausbreitungsrichtung
Teilchen pro Segment	100	Spurstrahlen pro Raumwinkelsegment

5.3 Ergebnisse bei Verwendung von SHIELDOSE

5.3.1 Die Tiefendosiskurve von SHIELDOSE

Für das hier verwendete Missionsszenario (siehe Abschnitt 4.3.2 bzw. 5.2.6) wurde die in Abbildung 42 dargestellte Tiefendosiskurve mit SHIELDOSE-2Q (siehe Abschnitt 2.5.1.2) in SPENVIS [20] erstellt. Die zugehörigen tabellierten Daten befinden sich in Tabelle 53 im Anhang C. Zusammen mit den errechneten Sektorabschirmungen ermittelt SSAT damit die absorbierte Dosis an einem Punkt.

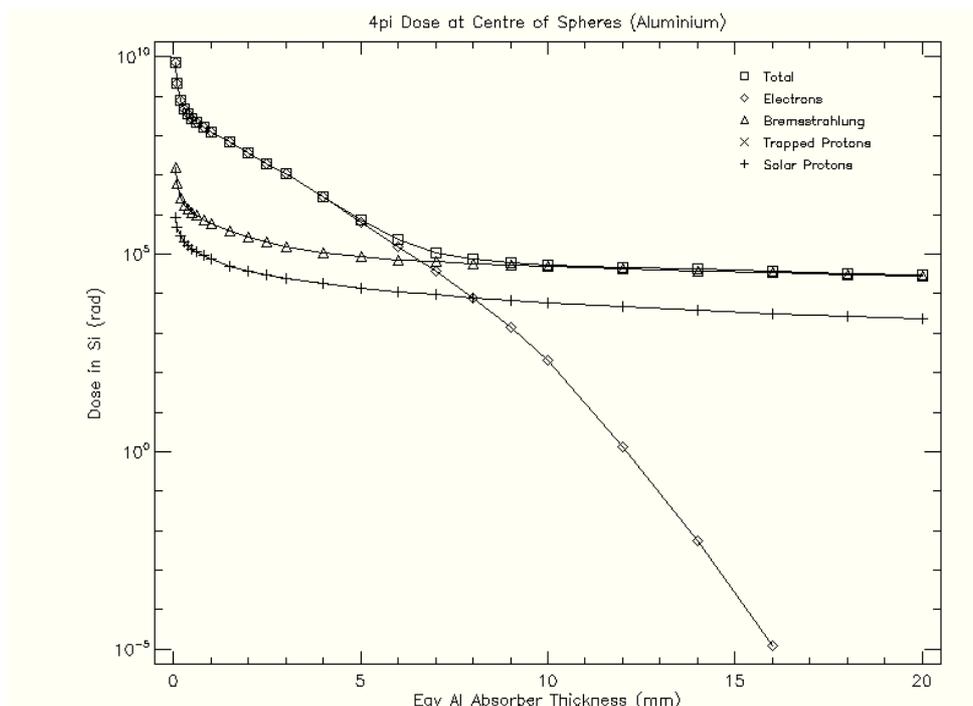


Abbildung 42: Tiefendosiskurve zum Missionsszenario erstellt mit SHIELDOSE-2Q über SPENVIS.

5.3.2 Vergleich von GRAS mit SSAT in Verbindung mit SHIELDOSE

Die detaillierten Ergebnisse der jeweiligen Berechnungen befinden sich im Anhang C (GRAS-Berechnungen im Unterabschnitt C.2, SSAT mit SHIELDOSE Unterabschnitt C.3). Die Abweichungen der Ergebnisse beider Methoden berechnen sich nach der Gleichung

$$\text{Abweichung [\%]} = \left(\frac{D_{\text{SSAT}}}{D_{\text{GRAS}}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (18)$$

mit den jeweiligen Dosiswerten D und sind für die einfachen Körper in Tabelle 20 aufgetragen. Die Unsicherheit der Abweichung, d.h. der statistische Fehler, ergibt sich aus der Anwendung der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung auf Gleichung (18) unter Einbeziehung der Standardabweichungen der Dosismessungen ΔD :

$$\Delta \text{Abweichung [\%]} = \sqrt{\left(\frac{D_{\text{SSAT}}}{D_{\text{GRAS}}^2} \cdot \Delta D_{\text{GRAS}} \right)^2 + \left(\frac{1}{D_{\text{GRAS}}} \cdot \Delta D_{\text{SSAT}} \right)^2} \quad (19)$$

Die Werte beider Methoden stimmen für solare Protonen bei Aluminiumkörpern hervorragend miteinander überein. Für Körper aus Blei liegen die SSAT-Werte um etwa 50% unter denen von GRAS. Dies ist zwar zu erwarten, weil die Dosiskurve für Aluminium berechnet wurde, zeigt aber das grundlegende Problem der Materialabhängigkeit.

Auch bei den Elektronen ist die Materialabhängigkeit zu sehen. Viel gravierender sind hier jedoch die allgemeinen Abweichungen. So liegen die SSAT-Werte für Aluminiumkörper um ein Vielfaches von 5 bis 16 (!) höher als die von GRAS. Die Abweichungen für das simple Satellitenmodell mit 10 Volumina in Tabelle 21 sind etwas geringer und ausgeglichener. Trotzdem liegen die SSAT/SHIELDOSE-Werte aber um etwa 200% bis 600% über den GRAS-Werten. Für die Protonen ist auch hier die Übereinstimmung im Wesentlichen zufriedenstellend. Die SSAT/SHIELDOSE-Werte liegen im Allgemeinen bis maximal knapp 40% über den GRAS-Werten.

Die im Vergleich zu den einfachen Körpern gesteigerte Komplexität hat keinen Einfluss auf die Abweichungen. Bis auf eine geringe Materialsensibilität kann kein Zusammenhang erkannt werden. Vielmehr scheinen die Elektronen-Werte von SHIELDOSE grundlegend sehr stark von denen von GRAS abzuweichen, was sich vor allem an den extremen Abweichungen bei den einfachen Körpern zeigt.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Tabelle 20: Die Abweichungen der simulierten Dosen von SSAT und SHIELDOSE von GRAS für einfache Körper.

Anordnung				Solare Protonen		Gürtelelektronen	
Form	Dicke [mm Al eq.]	Größe [mm]	Material	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.
Kugel	1	10	Al	-8.55%	4.71%	433.62%	25.29%
	2	10	Al	-2.68%	4.98%	587.72%	33.38%
	1	100	Al	-1.10%	4.70%	518.74%	28.80%
	5	100	Al	-4.63%	4.60%	1515.03%	79.98%
	10	100	Al	1.30%	5.01%	680.65%	36.26%
	1	10	Pb	-42.88%	2.53%	1178.54%	70.50%
	2	10	Pb	-43.29%	2.56%	3243.00%	141.78%
	1	100	Pb	-48.62%	2.06%	1304.35%	67.89%
	5	100	Pb	-49.83%	2.50%	1129.48%	61.71%
	10	100	Pb	-49.65%	2.23%	88.54%	8.95%
Box	1	10	Al	4.73%	4.72%	471.02%	32.84%
	2	10	Al	7.86%	5.38%	487.23%	34.44%
	1	100	Al	10.27%	4.16%	460.97%	31.96%
	5	100	Al	2.04%	5.07%	693.06%	33.90%
	10	100	Al	19.17%	5.95%	641.92%	34.87%
	1	10	Pb	-42.49%	2.80%	935.04%	52.54%
	2	10	Pb	-42.63%	2.87%	1870.19%	105.61%
	1	100	Pb	-45.18%	2.66%	991.10%	54.02%
	5	100	Pb	-50.20%	1.99%	438.00%	26.19%
	10	100	Pb	-49.75%	2.26%	28.22%	5.66%
Zylinder	1	10	Al	6.91%	5.36%	403.88%	23.82%
	2	10	Al	8.70%	5.44%	565.07%	33.28%
	1	100	Al	11.66%	5.23%	518.22%	27.23%
	5	100	Al	9.53%	5.49%	1018.49%	56.97%
	10	100	Al	3.95%	5.21%	649.71%	34.20%
	1	10	Pb	-45.78%	2.62%	1049.42%	54.24%
	2	10	Pb	-51.63%	2.42%	2452.18%	125.80%
	1	100	Pb	-44.64%	2.77%	1011.33%	47.95%
	5	100	Pb	-52.61%	2.23%	748.51%	39.94%
	10	100	Pb	-53.07%	2.48%	62.73%	7.67%

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Tabelle 21: Die Abweichungen der simulierten Dosen von SSAT und SHIELDOSE von GRAS für das Satellitenmodell mit 10 Volumina.

Anordnung				Solare Protonen		Van-Allen-Elektronen	
Target-Position	Targetmaße [mm]	# Formen	# Materialien	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.
0/0/0	80x150x0.01	1	1	4.41%	5.24%	617.61%	35.59%
	80x150x0.01	1	3	8.31%	5.64%	479.19%	28.20%
	80x150x0.01	1	5	21.77%	6.12%	583.33%	32.36%
	80x150x0.01	3	1	5.73%	3.47%	588.76%	34.06%
	80x150x0.01	3	3	14.65%	5.58%	494.49%	29.98%
	80x150x0.01	3	5	17.69%	4.85%	514.00%	28.44%
	80x150x0.01	5	1	5.81%	4.52%	566.50%	31.02%
	80x150x0.01	5	3	0.79%	4.87%	484.58%	28.46%
	80x150x0.01	5	5	13.07%	3.82%	552.92%	31.91%
1/0/0	0.01x100x100	1	1	8.58%	4.21%	382.69%	19.62%
	0.01x100x100	1	3	30.82%	4.79%	245.01%	16.95%
	0.01x100x100	1	5	36.16%	3.92%	266.85%	18.26%
	0.01x100x100	3	1	12.44%	4.96%	383.88%	19.24%
	0.01x100x100	3	3	25.98%	5.40%	270.54%	15.20%
	0.01x100x100	3	5	28.88%	6.13%	289.29%	18.33%
	0.01x100x100	5	1	15.46%	5.67%	395.23%	19.80%
	0.01x100x100	5	3	19.77%	6.02%	243.73%	14.39%
	0.01x100x100	5	5	37.48%	6.67%	252.72%	11.02%
0/1/0	100x0.01x100	1	1	11.16%	2.71%	388.68%	21.17%
	100x0.01x100	1	3	18.31%	3.50%	261.25%	16.41%
	100x0.01x100	1	5	20.27%	5.67%	242.05%	16.70%
	100x0.01x100	3	1	5.93%	2.08%	389.24%	22.69%
	100x0.01x100	3	3	18.57%	6.19%	251.88%	17.56%
	100x0.01x100	3	5	30.88%	3.09%	225.25%	12.92%
	100x0.01x100	5	1	8.63%	3.38%	413.76%	24.81%
	100x0.01x100	5	3	23.47%	3.62%	239.18%	17.09%
	100x0.01x100	5	5	18.88%	5.64%	206.55%	11.87%
1/1/1	100x100x0.01	1	1	25.47%	6.08%	318.75%	19.61%
	100x100x0.01	1	3	21.95%	5.64%	256.22%	10.57%
	100x100x0.01	1	5	20.21%	4.91%	230.45%	7.93%
	100x100x0.01	3	1	22.97%	5.47%	332.65%	20.92%
	100x100x0.01	3	3	20.45%	5.94%	240.17%	10.74%
	100x100x0.01	3	5	21.62%	5.95%	240.17%	8.27%
	100x100x0.01	5	1	13.70%	5.70%	351.14%	22.48%
	100x100x0.01	5	3	20.14%	5.80%	242.03%	12.78%
	100x100x0.01	5	5	20.34%	5.59%	255.95%	14.70%

5.3.3 Mögliche Ursachen der Abweichung

Die erheblichen Abweichungen werfen die Frage auf, inwieweit SHIELDOSE überhaupt zuverlässige Ergebnisse Elektronen betreffend liefert. Für Protonen scheinen die Werte für die hier betrachtete Energieverteilung dagegen recht gut mit jenen von GRAS übereinzustimmen. Zur Veranschaulichung der Unterschiede sind die mit GRAS erzeugte Tiefendosiskurve für Elektronen (Details in Abschnitt 5.4.1) und die Dosiswerte für Elektronen inklusive Bremsstrahlung von SHIELDOSE-2 für das untersuchte Missionsszenario in Abbildung 43 zu sehen.

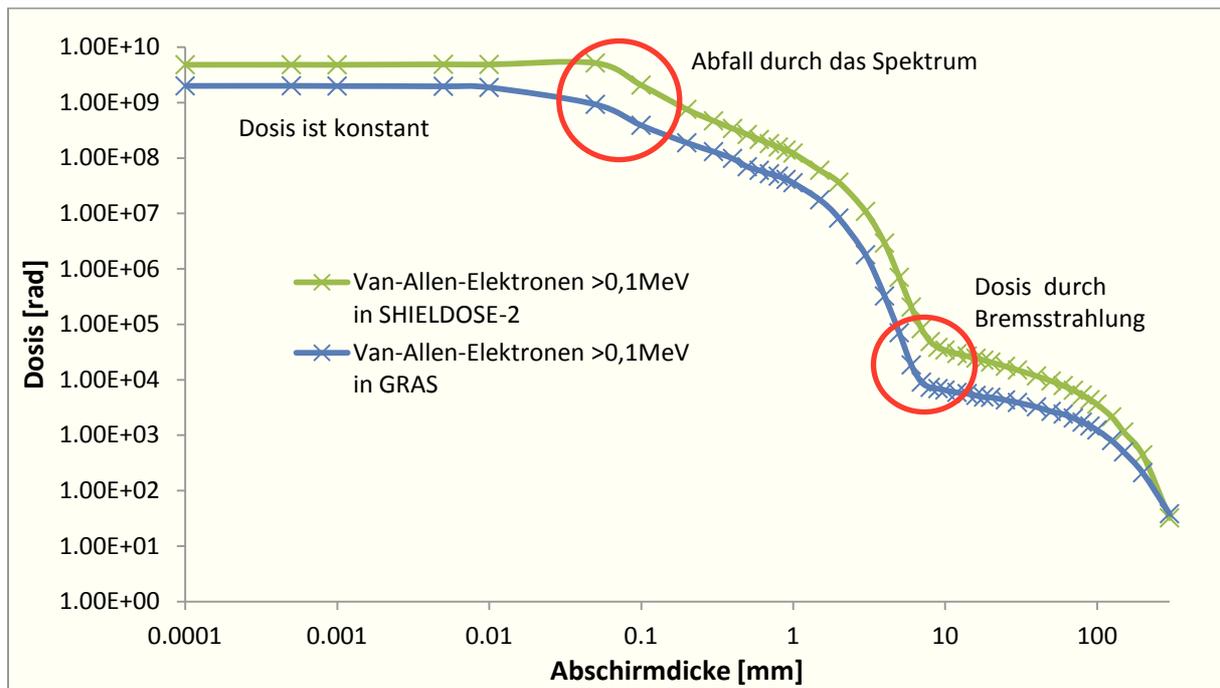


Abbildung 43: Die Unterschiede der absorbierten Dosis von GRAS zu SHIELDOSE-2 sind trotz logarithmischer Skalierung deutlich zu sehen. Besonders stark ist die Abweichung in den rot markierten Bereichen, wo durch die begrenzte Reichweite der Elektronen Änderungen in der Steigung der Kurve auftreten.

Ganz allgemein lässt sich die Tiefendosiskurve in drei Bereiche einteilen: im ersten ist die Dosis etwa konstant, weil das Spektrum bei 0,1 MeV abgeschnitten wurde und alle Elektronen die Abschirmung durchdringen können. Im zweiten fällt die Dosis inklusive dem Knick bei etwa 2 mm dem Spektrum entsprechend stark ab und im Dritten kommt die Dosis ausschließlich durch die Bremsstrahlung zustande. Beim Übergang der Bereiche ineinander ist die Abweichung, die bis auf große Dicken überall vorhanden ist, besonders stark und beträgt nahezu eine Größenordnung. Vermutlich liegt dem ein Unterschied in den Elektronenreichweiten des bei SHIELDOSE-2 verwendeten ETRAN-Modells zu Geant4 zugrunde, das offensichtlich kürzere Reichweiten ermittelt.

Diese Beobachtungen decken sich im Wesentlichen mit den Rechnungen von Lindberg et al. [89], die GRAS/Geant4 direkt mit SHIELDOSE verglichen haben. Die GRAS-Messungen erfolgten dabei in einer vergleichbaren Konfiguration (Plattengeometrie, monoenergetische Teilchen) wie SHIELDOSE, wobei die folgenden Sachverhalte von ihnen festgestellt wurden:

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

- Die Dosen für Protonen stimmen meistens bis auf 1 - 3% überein.
- Unterschiede gibt es bei der Schwellenenergie, bei der die Protonen eine gewisse Dicke gerade noch durchdringen können. Geant4 errechnet niedrigere Reichweiten, was zu Unterschieden bis zu Faktor 2 führt.
- Teilweise größere Unterschiede bei Elektronen niedriger Energien.
- Bessere Übereinstimmung bei Elektronen hoher Energie.

Alle diese Erkenntnisse zusammenfassend liegen insbesondere bei Elektronen bereits größere Unterschiede zu GRAS/Geant4 bei den tabellierten Daten von SHIELDOSE-2 vor, die auf dem ETRAN-Code basieren und systematisch höher als die Werte von Geant4 sind. Zusätzliche mögliche Fehlerquellen liegen in der Methodik, mit der die Daten für SHIELDOSE gewonnen wurden. So wurde die Absorption in Aluminium simuliert und dann auf Silizium umgerechnet [64]. Die Berechnungen erfolgten außerdem alle für eine Plattengeometrie. Die Werte für die hier eingesetzte Kugelgeometrie wurden aus den Plattendaten durch Umrechnung gewonnen [63].

Einen großen Unterschied können zudem die gewählten Targetmaße verursachen. So ist die selbsterstellte GRAS-Tiefendosiskurve für die Simulation jeder Abschirmdicke mit dem kompletten Spektrum bestrahlt worden, wobei der Radius der Targetkugel im Zentrum aus praktischen Gründen (Simulationszeit) mit der Abschirmdicke mitgewachsen ist. Damit steigt aber in gewissem Maße auch die Selbstabschirmung. Die Targetmaße für die Berechnung der tabellierten SHIELDOSE-Werte wurden dagegen für jede Teilchenenergie der Reichweite entsprechend angepasst [64]. Damit sind die Dosiswerte aus SHIELDOSE aber für ein Spektrum natürlich nicht exakt, denn ein reales Target hat eine fixierte Größe für Teilchen jeder Energie, aber hier sind sie aus komplett verschiedenen Targetgrößen für alle Teilchenenergien des untersuchten Spektrums zusammengesetzt.

5.4 Ergebnisse bei Verwendung einer GRAS-Tiefendosiskurve

5.4.1 Die GRAS-Tiefendosiskurve

Um den Einfluss von SHIELDOSE auf die Methode der Sektoranalyse ausschalten zu können wurde die in Abbildung 44 dargestellte Tiefendosiskurve mit GRAS berechnet. Dazu wurden dieselben Spektren für Protonen und Elektronen verwendet wie in den GRAS-Simulationen der Satelliten. Dabei wurde eine Vollkugelgeometrie, die derjenigen von SHIELDOSE (siehe 2.5.1.2) entspricht, als Abschirmmaterial Aluminium und als Targetmaterial Silizium verwendet. Der Radius des Targets beträgt zunächst bis zu 0,4 mm Abschirmung 0,1 mm, zwischen 0,5 und 1 mm 0,2 mm und für tiefere Abschirmungen immer 20% der Dicke der Abschirmung. Die detaillierten Ergebnisse und Parameter der Simulation befinden sich in Anhang C.1.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

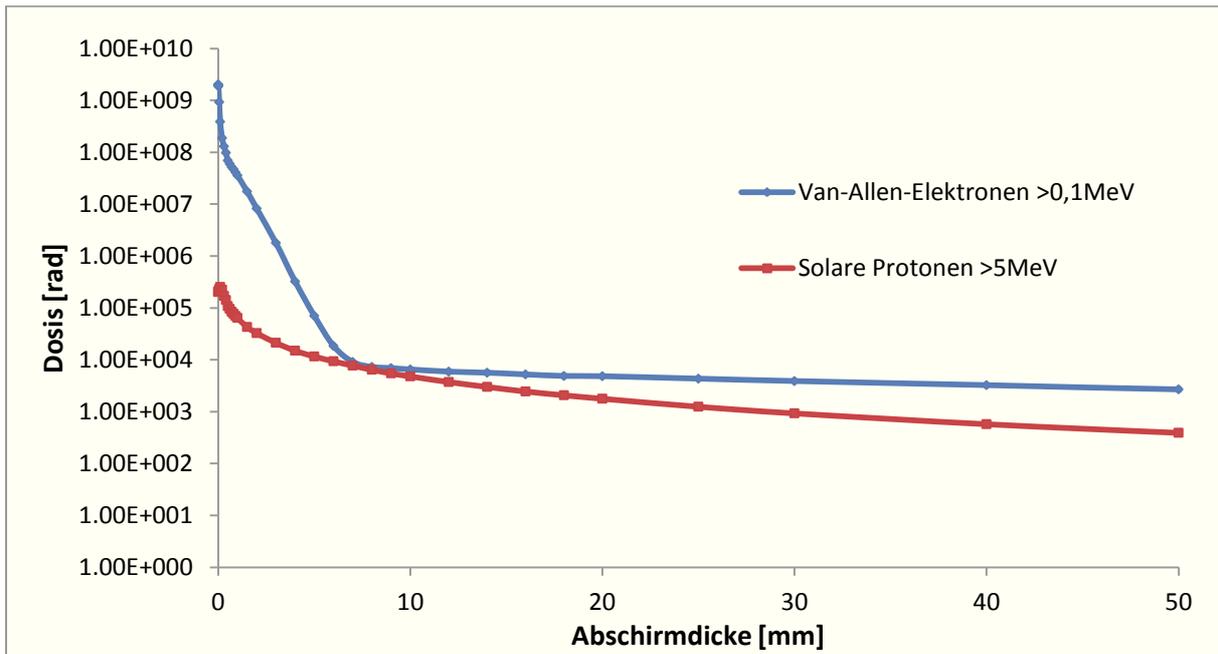


Abbildung 44: Mit GRAS erstellte Tiefendosiskurve für das bei den Simulationen verwendete Spektrum.

5.4.2 Vergleich von GRAS mit SSAT in Verbindung mit der GRAS-Tiefendosiskurve

Die vollständigen Ergebnisse der folgenden Abschnitte befinden sich in Anhang C.2 für die Rechnungen mit GRAS bzw. C.4 für jene mit SSAT.

5.4.2.1 Einfache Körper

Die Abweichungen der Dosiswerte der Sektoranalyse von denen von GRAS nach den Gleichungen (18) und (19) sind für die einfachen Körper in Tabelle 22 aufgetragen. Die Protodosen liegen bei der Sektoranalyse durchgängig niedriger als die von GRAS, wobei die Werte für die Aluminiumkörper gut übereinstimmen (maximale Abweichung von etwa 20%). Bei den Bleiobjekten liegt die Abweichung konstant bei -50% bis -60%, was durch das schlechtere Protonenmassenbremsvermögen von Blei verursacht wird. Beim Blick auf die einzelnen Körper fällt auf, dass interessanterweise die Ergebnisse der Kugelform am stärksten abweichen, obwohl die Primärdaten der Dosiskurve für eine Kugelform berechnet wurden. Da die Unterschiede in den Abweichungen aber nur im Rahmen der allgemeinen Messunsicherheit liegen, ist von einem zufälligen Effekt auszugehen.

Bei den Elektronen sind die Abweichungen größer, wobei hier die Sektoranalyse nahezu durchgehend den höheren Wert ergibt. Bei den Aluminiumkörpern liegen sie aber durchgehend in einem Bereich, der als akzeptabel angesehen werden kann. Die beste Übereinstimmung liegt hier bei größeren Dicken, was mit dem erheblich niedrigeren Gradienten der Tiefendosiskurve in diesem Bereich erklärt werden kann. Die Bleikörper weichen dagegen extrem ab. So wird bei kleinen Abschirmdicken von 1 mm und 2 mm die Dosis durch die Sektoranalyse stark über, bei größeren Dicken von 5 mm und 10 mm zumindest teilweise stark unterschätzt. Dieser Effekt erklärt sich durch die bei Blei erheblich verstärkte Bremsstrahlungserzeugung: im Bereich hoher Abschirmung ist der Bremsstrahlungsanteil an der Gesamtdosis dominierend.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Tabelle 22: Die Abweichungen der simulierten Dosen von SSAT mit der GRAS-Tiefendosiskurve von GRAS für einfache Körper.

Anordnung				Solare Protonen		Gürtelelektronen	
Form	Dicke [mm Al eq.]	Größe [mm]	Material	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.
Kugel	1	10	Al	-20.53%	4.10%	49.95%	7.11%
	2	10	Al	-16.71%	4.26%	53.28%	7.44%
	1	100	Al	-14.01%	4.09%	73.97%	8.10%
	5	100	Al	-20.35%	3.85%	59.40%	7.89%
	10	100	Al	-18.50%	4.03%	4.49%	4.85%
	1	10	Pb	-50.37%	2.19%	259.18%	19.80%
	2	10	Pb	-51.46%	2.19%	644.97%	31.59%
	1	100	Pb	-55.33%	1.79%	294.75%	19.08%
	5	100	Pb	-58.10%	2.09%	21.32%	6.09%
	10	100	Pb	-59.49%	1.79%	-74.76%	1.20%
Box	1	10	Al	-13.08%	3.92%	47.42%	8.48%
	2	10	Al	-7.76%	4.60%	24.20%	7.28%
	1	100	Al	-8.45%	3.45%	44.88%	8.25%
	5	100	Al	-15.43%	4.20%	-25.82%	3.17%
	10	100	Al	-5.19%	4.73%	4.84%	4.93%
	1	10	Pb	-52.28%	2.32%	167.09%	13.56%
	2	10	Pb	-50.94%	2.45%	316.56%	22.33%
	1	100	Pb	-54.50%	2.21%	181.67%	13.94%
	5	100	Pb	-58.73%	1.65%	-49.69%	2.45%
	10	100	Pb	-60.02%	1.80%	-81.88%	0.80%
Zylinder	1	10	Al	-9.57%	4.53%	34.98%	6.38%
	2	10	Al	-7.00%	4.66%	44.32%	7.22%
	1	100	Al	-5.51%	4.43%	65.69%	7.30%
	5	100	Al	-8.93%	4.57%	6.65%	5.43%
	10	100	Al	-16.97%	4.16%	3.56%	4.72%
	1	10	Pb	-54.15%	2.22%	207.79%	14.52%
	2	10	Pb	-58.61%	2.07%	453.67%	27.29%
	1	100	Pb	-53.16%	2.35%	197.74%	12.85%
	5	100	Pb	-60.60%	1.86%	-19.12%	3.81%
	10	100	Pb	-62.51%	1.98%	-77.51%	1.06%

5.4.2.2 Satellitenmodell mit 10 Volumina

Die Abweichungen der Dosiswerte der Sektoranalyse von denen von GRAS nach den Gleichungen (18) und (19) sind für den Satelliten mit 10 Volumina in Tabelle 23 aufgetragen.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Tabelle 23: Die Abweichungen der simulierten Dosen von SSAT mit der GRAS-Tiefendosiskurve von GRAS für das Satellitenmodell mit 10 Volumina.

Anordnung				Solare Protonen		Van-Allen-Elektronen	
Target-Position	Targetmaße [mm]	# Formen	# Materialien	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.
0/0/0	80x150x0.01	1	1	-12.80%	4.38%	55.44%	7.71%
	80x150x0.01	1	3	-10.70%	4.65%	27.12%	6.19%
	80x150x0.01	1	5	-2.34%	4.91%	48.66%	7.04%
	80x150x0.01	3	1	-11.03%	2.92%	48.59%	7.35%
	80x150x0.01	3	3	-4.73%	4.63%	30.58%	6.58%
	80x150x0.01	3	5	-5.20%	3.90%	33.82%	6.20%
	80x150x0.01	5	1	-10.90%	3.81%	44.63%	6.73%
	80x150x0.01	5	3	-16.52%	4.04%	28.32%	6.25%
	80x150x0.01	5	5	-9.35%	3.06%	41.95%	6.94%
1/0/0	0.01x100x100	1	1	-9.79%	3.50%	21.49%	4.94%
	0.01x100x100	1	3	10.10%	4.03%	-6.07%	4.61%
	0.01x100x100	1	5	11.78%	3.22%	-1.46%	4.90%
	0.01x100x100	3	1	-6.62%	4.12%	21.68%	4.84%
	0.01x100x100	3	3	6.09%	4.55%	0.96%	4.14%
	0.01x100x100	3	5	5.83%	5.03%	4.67%	4.93%
	0.01x100x100	5	1	-4.15%	4.71%	24.41%	4.97%
	0.01x100x100	5	3	0.90%	5.07%	-6.32%	3.92%
	0.01x100x100	5	5	12.92%	5.48%	-5.11%	2.96%
0/1/0	100x0.01x100	1	1	-8.48%	2.23%	24.21%	5.38%
	100x0.01x100	1	3	0.59%	2.97%	1.75%	4.62%
	100x0.01x100	1	5	-1.60%	4.64%	-6.36%	4.57%
	100x0.01x100	3	1	-12.86%	1.71%	23.52%	5.73%
	100x0.01x100	3	3	0.64%	5.25%	-1.51%	4.91%
	100x0.01x100	3	5	7.40%	2.54%	-10.72%	3.54%
	100x0.01x100	5	1	-10.64%	2.78%	29.62%	6.26%
	100x0.01x100	5	3	4.88%	3.07%	-5.05%	4.78%
	100x0.01x100	5	5	-2.41%	4.63%	-15.84%	3.26%
1/1/1	100x100x0.01	1	1	3.99%	5.04%	5.60%	4.94%
	100x100x0.01	1	3	3.11%	4.77%	-1.86%	2.91%
	100x100x0.01	1	5	-1.40%	4.03%	-10.53%	2.15%
	100x100x0.01	3	1	1.93%	4.53%	9.10%	5.28%
	100x100x0.01	3	3	1.84%	5.02%	-6.31%	2.96%
	100x100x0.01	3	5	-0.24%	4.88%	-7.92%	2.24%
	100x100x0.01	5	1	-5.75%	4.72%	14.19%	5.69%
	100x100x0.01	5	3	1.69%	4.91%	-5.37%	3.54%
	100x100x0.01	5	5	-1.37%	4.58%	-3.59%	3.98%

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Die Abweichungen der beiden Verfahren bei den Protonenwerten sind für das rudimentäre Satellitenmodell sehr gering und betragen maximal -16,5%. Für die Position in der Mitte des Satelliten sind die Dosen der Sektoranalyse durchgehend niedriger, für die anderen Positionen halten sich die Werte über bzw. unter der Monte-Carlo-Dosis etwa die Waage.

Bei den Abweichungen der Elektronendosen ergibt sich ein ähnliches Bild. Bei der zentralen Position liegen die SSAT-Werte ausnahmslos höher als die GRAS-Werte, während die Verhältnisse der anderen Positionen uneinheitlich sind. Insgesamt bewegen sich die Unterschiede für dieses vergleichsweise primitive Satellitenmodell in einem akzeptablen Rahmen, d.h. innerhalb eines Faktors von zwei (also Abweichungen zwischen -50% und 100%).

5.4.2.3 Satellitenmodell mit 100 Volumina

Die Abweichungen der Dosiswerte der Sektoranalyse von denen von GRAS nach den Gleichungen (18) und (19) sind für das Satellitenmodell mit 100 Volumina in Tabelle 24 aufgetragen. Die Positionen der einzelnen Detektoren sind wie in Abbildung 39 bezeichnet. Auch hier zeigt sich für die Protonen eine gute Übereinstimmung der beiden Verfahren. Tendenziell liegen die GRAS-Werte etwas höher, aber insgesamt sind die Abweichungen als minimal einzustufen.

Auch bei den Elektronen ist die Übereinstimmung relativ gut, auch wenn die Abweichungen größer sind und zwischen Über- und Unterschätzung schwanken. Zudem fällt auf, dass Art und Umfang der Abweichungen stark positionsbezogen sind. Eine Diskussion zu diesem Sachverhalt findet sich in Abschnitt 5.4.3 statt.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Tabelle 24: Die Abweichungen der simulierten Dosen von SSAT mit der GRAS-Tiefendosiskurve von GRAS für das Satellitenmodell mit 100 Volumina.

Anordnung				Solare Protonen		Van-Allen-Elektronen	
Target-Position	Targetmaße [mm]	# Formen	# Materialien	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.
Det 3 1	100x100x0.01	1	2	-12.01%	1.78%	14.55%	3.20%
Det 3 2	100x100x0.01			-14.02%	2.36%	-11.65%	2.51%
Det 3 3	100x100x0.01			-11.43%	2.53%	13.81%	4.04%
Det 4 1	100x100x0.01			-16.66%	3.22%	40.31%	6.48%
Det 4 2	100x100x0.01			-12.32%	1.71%	13.90%	3.60%
Det 4 3	100x100x0.01			-16.37%	3.57%	-42.29%	4.71%
Det 4 4	100x100x0.01			-6.71%	2.27%	27.12%	3.75%
Det 5 1	100x100x0.01			-17.91%	2.26%	-23.67%	2.38%
Det 5 2	100x100x0.01			-17.36%	1.98%	-11.50%	2.43%
Det 5 3	100x100x0.01			-11.63%	1.99%	-0.60%	2.85%
Det 5 4	100x100x0.01			-13.93%	2.63%	24.00%	4.73%
Det 6 1	100x100x0.01			-9.68%	3.42%	-1.44%	3.76%
Det 6 2	100x100x0.01			-12.66%	1.87%	-32.03%	2.02%
Det 6 3	100x100x0.01			-12.07%	1.87%	23.81%	3.50%
Det 7 1	100x100x0.01			-15.53%	2.92%	21.22%	4.66%
Det 7 2	100x100x0.01			-13.26%	2.07%	17.65%	3.81%
Det 8 1	100x100x0.01	-13.98%	1.26%	13.58%	1.32%		
Det 3 1	100x100x0.01	1	5	-0.78%	2.01%	28.52%	2.65%
Det 3 2	100x100x0.01			-5.69%	2.29%	-11.09%	1.95%
Det 3 3	100x100x0.01			-6.14%	2.25%	35.80%	3.86%
Det 4 1	100x100x0.01			-7.73%	3.21%	37.32%	5.04%
Det 4 2	100x100x0.01			-3.59%	1.84%	20.29%	3.03%
Det 4 3	100x100x0.01			-7.63%	2.90%	-38.49%	3.78%
Det 4 4	100x100x0.01			-0.08%	1.82%	34.22%	2.92%
Det 5 1	100x100x0.01			-6.89%	1.87%	-24.09%	1.77%
Det 5 2	100x100x0.01			-5.98%	2.23%	-3.26%	2.07%
Det 5 3	100x100x0.01			-4.78%	2.16%	2.30%	2.33%
Det 5 4	100x100x0.01			-2.50%	3.02%	29.40%	3.95%
Det 6 1	100x100x0.01			-4.05%	2.95%	5.13%	3.25%
Det 6 2	100x100x0.01			-6.51%	1.67%	-28.03%	1.68%
Det 6 3	100x100x0.01			-3.31%	1.84%	27.86%	2.80%
Det 7 1	100x100x0.01			-5.37%	2.92%	20.37%	3.56%
Det 7 2	100x100x0.01			-1.72%	2.33%	16.92%	3.02%
Det 8 1	100x100x0.01	-13.96%	1.30%	14.55%	1.32%		
Det 3 1	100x100x0.01	1	9	-5.39%	2.30%	27.28%	2.78%
Det 3 2	100x100x0.01			-6.00%	2.20%	-9.66%	1.99%
Det 3 3	100x100x0.01			0.93%	2.45%	30.10%	3.74%
Det 4 1	100x100x0.01			-5.81%	3.27%	39.60%	5.32%
Det 4 2	100x100x0.01			-3.67%	1.97%	21.01%	3.09%
Det 4 3	100x100x0.01			-20.62%	3.70%	-45.99%	3.41%
Det 4 4	100x100x0.01			-1.89%	2.09%	32.30%	2.85%
Det 5 1	100x100x0.01			-5.92%	1.85%	-24.19%	1.84%
Det 5 2	100x100x0.01			-2.98%	2.19%	-6.30%	1.94%
Det 5 3	100x100x0.01			-5.27%	2.01%	2.86%	2.36%
Det 5 4	100x100x0.01			2.50%	2.80%	31.87%	3.95%
Det 6 1	100x100x0.01			-0.89%	3.16%	7.16%	3.29%
Det 6 2	100x100x0.01			-7.41%	1.67%	-27.16%	1.69%
Det 6 3	100x100x0.01			-3.36%	1.87%	29.24%	2.86%
Det 7 1	100x100x0.01			-4.96%	2.74%	22.02%	3.70%
Det 7 2	100x100x0.01			-1.39%	2.29%	15.61%	2.90%
Det 8 1	100x100x0.01	-14.59%	1.32%	14.99%	1.33%		

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Anordnung				Solare Protonen		Van-Allen-Elektronen	
Target-Position	Targetmaße	# For-men	# Mate-rialien	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.
Det 3 1	100x100x0.01	3	2	-12.93%	1.96%	19.16%	3.36%
Det 3 2	100x100x0.01			-16.27%	2.24%	-11.89%	2.48%
Det 3 3	100x100x0.01			-8.93%	2.43%	16.44%	4.26%
Det 4 1	100x100x0.01			-14.62%	2.64%	45.40%	6.72%
Det 4 2	100x100x0.01			-12.23%	1.66%	18.17%	3.67%
Det 4 3	100x100x0.01			-15.93%	2.58%	-34.94%	5.41%
Det 4 4	100x100x0.01			-7.85%	1.97%	24.34%	3.62%
Det 5 1	100x100x0.01			-11.68%	1.68%	-25.07%	2.21%
Det 5 2	100x100x0.01			-15.61%	1.83%	-9.47%	2.47%
Det 5 3	100x100x0.01			-13.16%	1.97%	2.22%	3.04%
Det 5 4	100x100x0.01			-11.95%	2.75%	30.23%	4.96%
Det 6 1	100x100x0.01			-12.52%	2.82%	-5.52%	3.78%
Det 6 2	100x100x0.01			-14.52%	1.79%	-32.82%	2.07%
Det 6 3	100x100x0.01			-9.61%	1.71%	22.47%	3.60%
Det 7 1	100x100x0.01			-10.55%	2.75%	22.73%	4.65%
Det 7 2	100x100x0.01			-12.38%	2.60%	23.75%	4.16%
Det 8 1	100x100x0.01	-14.77%	1.23%	13.21%	1.31%		
Det 3 1	100x100x0.01	3	5	-2.69%	1.91%	31.32%	2.84%
Det 3 2	100x100x0.01			-2.44%	2.00%	-10.84%	1.98%
Det 3 3	100x100x0.01			-0.57%	2.49%	35.06%	4.04%
Det 4 1	100x100x0.01			-4.03%	2.97%	42.23%	5.27%
Det 4 2	100x100x0.01			0.16%	1.90%	21.67%	3.16%
Det 4 3	100x100x0.01			-9.75%	2.58%	-39.69%	4.15%
Det 4 4	100x100x0.01			-0.76%	2.06%	40.13%	3.16%
Det 5 1	100x100x0.01			-3.28%	1.84%	-25.69%	1.76%
Det 5 2	100x100x0.01			-1.18%	1.88%	-5.22%	2.00%
Det 5 3	100x100x0.01			-6.50%	2.03%	0.75%	2.32%
Det 5 4	100x100x0.01			2.88%	2.63%	32.64%	4.12%
Det 6 1	100x100x0.01			-7.32%	3.42%	4.49%	3.21%
Det 6 2	100x100x0.01			-3.25%	1.73%	-30.67%	1.61%
Det 6 3	100x100x0.01			-2.93%	2.00%	25.67%	2.92%
Det 7 1	100x100x0.01			-2.31%	3.04%	19.80%	3.65%
Det 7 2	100x100x0.01			-6.60%	2.37%	18.22%	2.92%
Det 8 1	100x100x0.01	-12.66%	1.27%	15.65%	1.33%		
Det 3 1	100x100x0.01	3	9	-0.15%	1.70%	28.94%	2.84%
Det 3 2	100x100x0.01			-4.19%	2.04%	-8.38%	1.99%
Det 3 3	100x100x0.01			-3.19%	2.62%	31.48%	3.90%
Det 4 1	100x100x0.01			-9.21%	3.06%	45.45%	5.27%
Det 4 2	100x100x0.01			-2.56%	1.75%	27.54%	3.20%
Det 4 3	100x100x0.01			-12.97%	2.99%	-34.74%	4.40%
Det 4 4	100x100x0.01			-0.70%	2.00%	44.16%	3.16%
Det 5 1	100x100x0.01			-8.04%	1.99%	-18.99%	1.90%
Det 5 2	100x100x0.01			-3.61%	2.27%	-7.44%	1.99%
Det 5 3	100x100x0.01			-6.06%	2.07%	3.23%	2.38%
Det 5 4	100x100x0.01			-2.38%	2.63%	28.69%	3.93%
Det 6 1	100x100x0.01			-0.94%	2.88%	2.25%	3.14%
Det 6 2	100x100x0.01			-6.09%	1.71%	-29.10%	1.66%
Det 6 3	100x100x0.01			-2.94%	1.95%	27.75%	2.81%
Det 7 1	100x100x0.01			-1.89%	2.77%	22.64%	3.73%
Det 7 2	100x100x0.01			-0.90%	2.03%	23.33%	3.11%
Det 8 1	100x100x0.01	-13.23%	1.37%	14.03%	1.32%		

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Anordnung				Solare Protonen		Van-Allen-Elektronen	
Target-Position	Targetmaße	# For-men	# Mate-rialien	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.
Det 3 1	100x100x0.01	9	2	-12.54%	1.74%	22.62%	3.48%
Det 3 2	100x100x0.01			-16.27%	2.32%	-9.76%	2.56%
Det 3 3	100x100x0.01			-11.33%	2.77%	28.69%	4.65%
Det 4 1	100x100x0.01			-11.86%	2.93%	44.84%	6.84%
Det 4 2	100x100x0.01			-12.28%	1.69%	17.85%	3.76%
Det 4 3	100x100x0.01			-19.52%	2.57%	-37.26%	4.71%
Det 4 4	100x100x0.01			-9.15%	1.79%	23.21%	3.60%
Det 5 1	100x100x0.01			-15.55%	1.80%	-23.59%	2.25%
Det 5 2	100x100x0.01			-13.60%	1.95%	-14.12%	2.40%
Det 5 3	100x100x0.01			-13.93%	2.13%	-2.46%	3.03%
Det 5 4	100x100x0.01			-9.83%	2.40%	23.90%	4.54%
Det 6 1	100x100x0.01			-13.27%	2.50%	14.49%	4.39%
Det 6 2	100x100x0.01			-13.24%	1.65%	-30.08%	2.06%
Det 6 3	100x100x0.01			-8.45%	1.91%	20.17%	3.64%
Det 7 1	100x100x0.01			-12.48%	2.65%	13.35%	4.42%
Det 7 2	100x100x0.01			-14.58%	2.25%	25.64%	3.82%
Det 8 1	100x100x0.01			-11.74%	1.36%	16.92%	1.38%
Det 3 1	100x100x0.01			9	5	-2.42%	2.05%
Det 3 2	100x100x0.01	-7.76%	2.31%			-9.18%	1.91%
Det 3 3	100x100x0.01	-3.98%	2.90%			40.65%	4.04%
Det 4 1	100x100x0.01	-3.54%	3.08%			42.01%	5.27%
Det 4 2	100x100x0.01	-3.42%	1.81%			20.70%	3.12%
Det 4 3	100x100x0.01	-13.47%	3.13%			-33.97%	4.04%
Det 4 4	100x100x0.01	-2.06%	2.12%			35.34%	2.96%
Det 5 1	100x100x0.01	-7.65%	2.13%			-22.64%	1.89%
Det 5 2	100x100x0.01	-2.53%	2.11%			-3.60%	2.04%
Det 5 3	100x100x0.01	-7.13%	1.98%			-0.17%	2.29%
Det 5 4	100x100x0.01	-2.19%	2.59%			28.22%	3.84%
Det 6 1	100x100x0.01	-4.13%	2.83%			4.82%	3.16%
Det 6 2	100x100x0.01	-6.05%	1.89%			-30.10%	1.63%
Det 6 3	100x100x0.01	-1.67%	1.79%			30.53%	2.85%
Det 7 1	100x100x0.01	-2.48%	2.66%			12.70%	3.36%
Det 7 2	100x100x0.01	0.32%	2.22%			18.71%	3.01%
Det 8 1	100x100x0.01	-8.52%	1.30%			17.64%	1.37%
Det 3 1	100x100x0.01	9	9			-1.72%	1.41%
Det 3 2	100x100x0.01			-5.57%	1.65%	-10.19%	2.02%
Det 3 3	100x100x0.01			-5.65%	1.88%	34.47%	3.82%
Det 4 1	100x100x0.01			-4.06%	2.32%	37.06%	5.22%
Det 4 2	100x100x0.01			-6.41%	1.43%	29.63%	3.31%
Det 4 3	100x100x0.01			-10.82%	2.44%	-36.84%	3.81%
Det 4 4	100x100x0.01			-1.39%	1.86%	30.68%	2.98%
Det 5 1	100x100x0.01			-4.41%	1.38%	-22.97%	1.84%
Det 5 2	100x100x0.01			-5.54%	1.63%	-4.35%	2.05%
Det 5 3	100x100x0.01			-3.18%	1.62%	-1.50%	2.28%
Det 5 4	100x100x0.01			-1.65%	1.92%	33.53%	3.98%
Det 6 1	100x100x0.01			-4.87%	2.20%	7.28%	3.39%
Det 6 2	100x100x0.01			-5.97%	1.41%	-27.94%	1.70%
Det 6 3	100x100x0.01			-1.71%	1.44%	26.35%	2.81%
Det 7 1	100x100x0.01			-5.09%	2.19%	18.31%	3.47%
Det 7 2	100x100x0.01			-3.10%	1.75%	24.75%	3.01%
Det 8 1	100x100x0.01			-11.16%	1.02%	17.85%	1.38%

5.4.2.4 Satellitenmodell mit maximaler Komplexität

Die Abweichungen der Dosiswerte der Sektoranalyse von denen von GRAS nach den Gleichungen (18) und (19) sind für das Satellitenmodell mit maximaler Komplexität in Tabelle 25 aufgetragen.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Tabelle 25: Die Abweichungen der simulierten Dosen von SSAT mit der GRAS-Tiefendosiskurve von GRAS für das Satellitenmodell mit maximaler Komplexität.

Bauteil	Anordnung		Solare Protonen		Van-Allen-Elektronen	
	Target-Position	Targetmaße [mm]	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.
1	3 2 O	80x80x1	9.38%	2.60%	42.43%	6.91%
	3 2 U	80x80x1	-24.42%	1.78%	-11.74%	9.31%
	4 1 OH	80x80x1	-17.20%	10.67%	54.34%	32.41%
	4 1 OV	80x80x1	-21.88%	7.93%	-58.62%	7.77%
	4 2 1 VO	80x80x1	-27.23%	1.81%	-62.52%	4.57%
	4 2 1 VU	80x80x1	-23.84%	1.87%	-56.18%	5.04%
	4 2 2 VO	80x80x1	-20.68%	2.48%	-36.35%	8.91%
	4 2 2 VU	80x80x1	-24.67%	2.42%	-69.42%	4.23%
	4 2 2 HO	80x80x1	-5.67%	3.26%	22.58%	12.89%
	4 2 2 HU	80x80x1	16.43%	3.40%	67.45%	15.43%
	4 3 2 V	80x80x1	-18.56%	2.77%	-44.12%	8.04%
	4 3 2 H	80x80x1	6.77%	3.66%	147.33%	30.57%
	5 1 V	80x80x1	-25.99%	1.68%	-62.40%	4.00%
	5 1 H	80x80x1	9.71%	2.52%	48.03%	7.20%
	5 3 VO	80x80x1	-25.84%	1.77%	-64.54%	4.11%
	5 3 VM	80x80x1	-24.19%	1.86%	-65.45%	3.96%
	5 3 VU	80x80x1	-22.13%	1.96%	-34.95%	7.27%
	5 3 HO	80x80x1	16.85%	2.83%	47.02%	7.71%
	5 3 HM	80x80x1	11.83%	2.75%	43.72%	7.47%
	5 3 HU	80x80x1	6.51%	2.64%	33.66%	7.10%
8 4 1 V	80x80x1	-19.86%	3.18%	36.41%	20.26%	
8 4 1 H	80x80x1	-12.70%	3.33%	30.12%	17.09%	
2	3 2 O	30x30x1	4.28%	5.30%	-66.13%	2.80%
	3 2 U	30x30x1	28.45%	5.71%	30.20%	8.77%
	4 1 OH	30x30x1	50.99%	34.39%	101.51%	36.29%
	4 1 OV	30x30x1	44.78%	21.45%	32.68%	20.30%
	4 2 1 VO	30x30x1	12.39%	5.75%	52.52%	12.00%
	4 2 1 VU	30x30x1	11.01%	5.30%	21.93%	8.44%
	4 2 2 VO	30x30x1	39.20%	11.00%	17.13%	16.91%
	4 2 2 VU	30x30x1	11.11%	6.70%	12.03%	12.37%
	4 2 2 HO	30x30x1	-29.78%	5.69%	-92.25%	1.19%
	4 2 2 HU	30x30x1	-31.76%	5.42%	-97.51%	0.37%
	4 3 2 V	30x30x1	16.03%	9.17%	61.33%	21.37%
	4 3 2 H	30x30x1	-15.62%	7.28%	-19.87%	11.11%
	5 1 V	30x30x1	20.66%	5.37%	44.47%	10.20%
	5 1 H	30x30x1	-20.34%	4.48%	-84.55%	1.48%
	5 3 VO	30x30x1	24.27%	5.72%	16.64%	7.66%
	5 3 VM	30x30x1	33.40%	6.43%	20.77%	8.26%
	5 3 VU	30x30x1	23.92%	6.08%	23.30%	8.45%
	5 3 HO	30x30x1	-25.58%	4.35%	-96.67%	0.34%
	5 3 HM	30x30x1	-27.66%	4.33%	-96.59%	0.36%
	5 3 HU	30x30x1	-16.55%	4.92%	-87.75%	1.20%
8 4 1 V	30x30x1	23.33%	11.17%	39.59%	19.98%	
8 4 1 H	30x30x1	6.82%	8.94%	-18.57%	10.99%	
3	3 2 O	80x10x5	54.01%	7.89%	385.55%	42.02%
	3 2 U	80x10x5	95.89%	6.65%	362.86%	20.92%
	4 1 OH	80x10x5	78.03%	25.98%	664.89%	120.25%
	4 1 OV	80x10x5	153.06%	32.48%	787.28%	119.29%
	4 2 1 VO	80x10x5	87.49%	7.36%	287.02%	19.60%
	4 2 1 VU	80x10x5	94.33%	7.57%	325.97%	21.70%
	4 2 2 VO	80x10x5	62.65%	8.77%	229.91%	29.21%
	4 2 2 VU	80x10x5	58.45%	8.46%	408.95%	50.17%
	4 2 2 HO	80x10x5	61.68%	11.70%	67.32%	21.33%
	4 2 2 HU	80x10x5	83.01%	11.88%	182.84%	32.69%

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Bauteil	Anordnung		Solare Protonen		Van-Allen-Elektronen	
	Target-Position	Targetmaße [mm]	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.	Abweichung in %	Unsicherheit der Abw.
3	4 3 2 V	80x10x5	44.49%	8.93%	36.02%	17.78%
	4 3 2 H	80x10x5	39.24%	9.40%	355.57%	57.01%
	5 1 V	80x10x5	96.43%	6.87%	297.49%	18.09%
	5 1 H	80x10x5	93.36%	8.36%	454.82%	40.48%
	5 3 VO	80x10x5	101.72%	7.50%	285.31%	18.30%
	5 3 VM	80x10x5	80.08%	6.57%	258.69%	16.41%
	5 3 VU	80x10x5	73.61%	6.23%	243.67%	16.14%
	5 3 HO	80x10x5	81.98%	8.68%	183.50%	22.47%
	5 3 HM	80x10x5	68.90%	8.06%	179.92%	22.63%
	5 3 HU	80x10x5	81.23%	8.77%	233.53%	28.13%
4	8 4 1 V	80x10x5	87.55%	11.82%	964.87%	117.85%
	8 4 1 H	80x10x5	40.97%	10.42%	815.82%	114.01%
	3 2 O	80x10x1	20.47%	6.17%	49.99%	12.66%
	3 2 U	80x10x1	30.42%	5.48%	53.22%	7.98%
	4 1 OH	80x10x1	7.01%	24.75%	203.09%	46.99%
	4 1 OV	80x10x1	25.27%	15.82%	217.66%	40.59%
	4 2 1 VO	80x10x1	11.46%	5.26%	37.87%	8.17%
	4 2 1 VU	80x10x1	18.22%	4.94%	49.12%	8.45%
	4 2 2 VO	80x10x1	5.46%	7.43%	2.83%	10.98%
	4 2 2 VU	80x10x1	14.62%	6.32%	27.59%	12.29%
	4 2 2 HO	80x10x1	-12.56%	7.59%	-45.03%	8.50%
	4 2 2 HU	80x10x1	-22.75%	6.96%	-96.25%	0.54%
	4 3 2 V	80x10x1	-2.75%	6.82%	281.54%	57.40%
	4 3 2 H	80x10x1	6.18%	9.78%	28.97%	18.17%
	5 1 V	80x10x1	21.71%	5.06%	57.82%	7.95%
	5 1 H	80x10x1	3.53%	6.67%	43.45%	17.59%
	5 3 VO	80x10x1	23.54%	5.38%	42.62%	7.68%
	5 3 VM	80x10x1	10.81%	4.74%	20.13%	6.39%
5 3 VU	80x10x1	18.63%	5.02%	42.05%	8.14%	
5 3 HO	80x10x1	-22.74%	5.20%	-73.22%	3.84%	
5 3 HM	80x10x1	-16.68%	5.84%	-56.99%	5.47%	
5 3 HU	80x10x1	-10.42%	6.35%	-16.90%	10.23%	
8 4 1 V	80x10x1	41.35%	10.85%	195.00%	35.37%	
8 4 1 H	80x10x1	21.61%	10.75%	139.71%	31.37%	
Dosimeter	D 01	200x80x0.1	2.36%	0.60%	12.75%	0.58%
	D 02	200x80x0.1	2.77%	1.09%	-13.84%	1.19%
	D 03	200x80x0.1	-2.80%	0.99%	-11.87%	1.66%
	D 04	200x80x0.1	-4.15%	0.99%	-14.50%	1.95%
	D 05	200x80x0.1	-5.95%	1.00%	-12.43%	2.29%
	D 06	200x80x0.1	-7.70%	1.00%	-15.59%	2.54%
	D 07	200x80x0.1	-1.59%	1.07%	-7.95%	3.03%
	D 08	200x80x0.1	-8.15%	1.01%	-12.55%	3.13%
	D 09	200x80x0.1	-7.15%	1.06%	-12.77%	3.39%
	D 10	200x80x0.1	-6.45%	1.07%	-7.84%	3.97%
	D 11	200x80x0.5	10.02%	1.23%	21.43%	4.94%
	D 12	200x80x0.5	4.47%	1.23%	11.80%	4.68%
	D 13	200x80x0.5	-0.73%	1.25%	9.14%	4.72%
	D 14	200x80x0.5	-2.36%	1.29%	6.33%	4.56%
	D 15	200x80x0.5	-4.98%	1.33%	-7.23%	3.86%
	D 16	200x80x0.5	-6.75%	1.35%	-16.59%	3.22%
	D 17	200x80x0.5	-6.87%	1.42%	-25.44%	3.91%
	D 18	200x80x0.5	-8.90%	1.44%	-30.60%	4.52%

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Die Positionen der Detektorbauteile beziehen sich auf die Nummern der Detektoren des 100-volumigen Satelliten in Abbildung 39. Eine weitere Nummer bezeichnet bei mehreren Platinen in einem Gehäuse die Platine und die Buchstaben, ob die Belegung vorne (V), hinten (H), unten (U), oben (O) oder in der Mitte (M) auf der Platine angebracht ist. Das Dosimeter besteht einfach aus 18 hintereinander angebrachten Schichten und misst die Tiefendosis in Silizium.

Bei Betrachtung der Protonenabweichungen fällt sofort auf, dass diese größer und stärker schwankend sind als in den einfacheren Modellen. Zudem hat erwartungsgemäß die Form des Targets einen Einfluss, was beim Vergleich der Bauteile deutlich wird. Dasselbe lässt sich für die Elektronendosen feststellen, bei denen die Schwankungen noch gravierender sind und einige Abweichungen die extremen Ausmaße annehmen, wie sie auch von Lindberg gefunden wurden [89]. Auf den ersten Blick fällt auf, dass die Abweichungen beim einfach strukturierten Dosimeter sehr gering ausfallen, während auf den anderen Positionen abhängig vom Target große Unterschiede festzustellen sind.

5.4.3 Einfluss der Gesamtkomplexität auf die Abweichung

Um den Einfluss der Gesamtkomplexität auf die Abweichung der errechneten Dosen einzuschätzen, werden die Resultate der Satellitenmodelle verglichen. Dazu werden verschiedene Komplexitätsgrößen betrachtet, nämlich die Anzahl der verwendeten Materialien, geometrischen Formen und Volumina.

5.4.3.1 Materialienzahl

Wie bereits die Ergebnisse der einfachen Körper (Abschnitt 5.4.2.1) gezeigt haben, kann das Material eine große Rolle bei der Abweichung der beiden Verfahren spielen. Abhilfe könnte für so eine Konfiguration aus einem anderen Stoff als Aluminium eine eigene Tiefendosiskurve für das entsprechende Material schaffen. Da ein realer Satellit aber nicht aus einem Material, sondern einer Vielzahl an Stoffen besteht, stellt sich die Frage, wie sich die Existenz verschiedener Materialien in einem Satelliten auf die Güte der Ergebnisse der Sektoranalyse auswirkt. Üblicherweise werden Tiefendosiskurven für Aluminium benutzt, was aus zwei Gründen sinnvoll ist: Aluminium kommt als sehr leichtes Metall in der Regel häufig in einem Satelliten vor. Zum anderen kommen überwiegend Stoffe mit leichten Atomkernen zum Einsatz, die ein ähnliches Bremsvermögen aufweisen.

Die Mittelwerte der Abweichungsbeträge aller untersuchten Modelle - also aller Positionen und Formen - mit gleicher Materialanzahl ergibt für die Satelliten mit 10 bzw. 100 Volumina die in Abbildung 45 aufgetragenen Werte. Für die Protonen zeigt sich mit steigender Materialanzahl ein tendenzielles Abnehmen der Abweichung. Dies überrascht, denn die Modelle mit einem bzw. zwei Materialien bestehen komplett bzw. nahezu komplett aus Aluminium wie die Tiefendosiskurve. Ähnlich sieht der Graph für Elektronen aus, wobei hier für Modelle mit 100 Volumina praktisch kein Unterschied mehr zu sehen ist.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

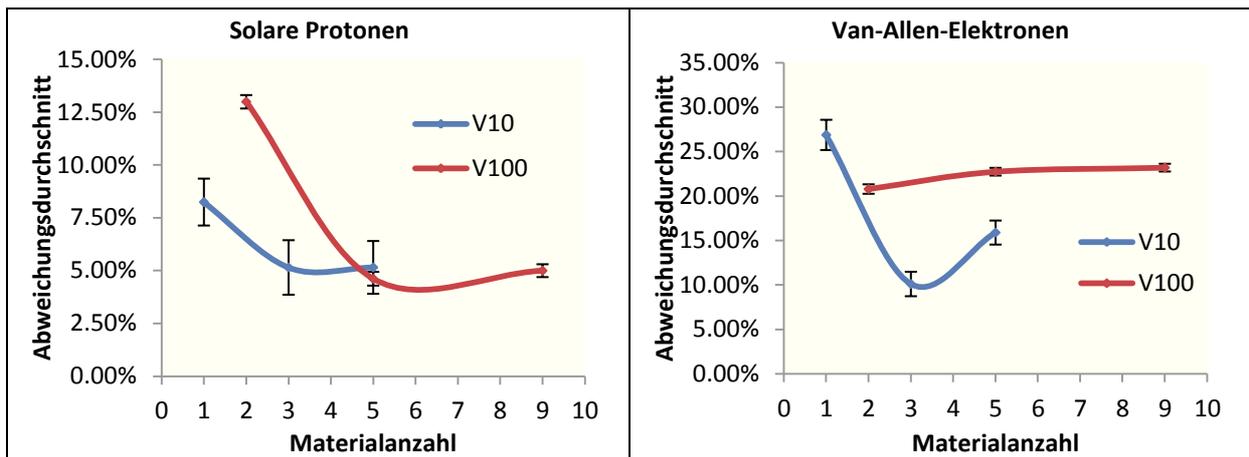


Abbildung 45: Die durchschnittlichen Abweichungsbeträge bei Satellitenmodellen mit 10 und 100 Volumen in Abhängigkeit der Anzahl der Materialien.

Zusammenfassend kann kein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden. Das Material hat zwar klar Einfluss, wie bei den einfachen Körpern deutlich zu sehen war. Die Gesamtmenge an Materialien scheint sich aber nicht eindeutig auszuwirken, zumal sich der Großteil der in einem Satelliten verbauten chemischen Elemente in ihrem Massenbremsvermögen nicht erheblich von Aluminium unterscheidet. Die Unterschiede in den Abweichungen verhalten sich insgesamt ungeordnet, sind offensichtlich zufällig und lassen daher keine sinnvolle Interpretation zu.

5.4.3.2 Formenzahl

Wie bei den einfachen Körpern zu sehen war, unterscheiden sich die Abweichungen für verschiedene geometrische Formen in einem gewissen Maße. Verursacht werden die Unterschiede vermutlich durch die abweichenden Weglängen durch den Körper.

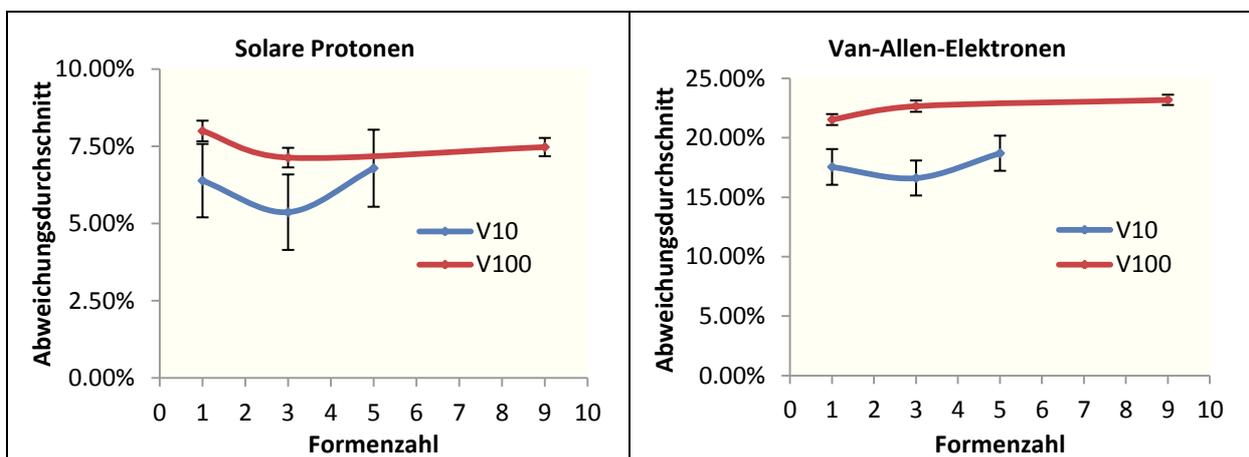


Abbildung 46: Die durchschnittlichen Abweichungsbeträge bei Satellitenmodellen mit 10 und 100 Volumen in Abhängigkeit der Anzahl der geometrischen Formen.

Als Teil der Komplexität eines Satelliten wird die Anzahl der geometrischen Formen betrachtet. Die Mittelwerte der Abweichungen aller untersuchten Modelle mit allen Materialanzahlen und Positionen wurden für jeweils gleiche Formenzahlen errechnet und in Abbildung 46 aufgetragen. Alle Graphen zeigen eindeutig sowohl für Protonen als auch für Elektronen, dass die Verschiedenheit der geometrischen Körper keinen Einfluss auf die Abweichungen hat.

5.4.3.3 Gesamtvolumenzahl

Da sich die Komplexität des Satelliten mit der Volumenzahl offensichtlich erhöht, wurde auch dieser Zusammenhang untersucht. Die durchschnittlichen Abweichungen für alle Satellitenmodelle in Abhängigkeit der Volumenanzahl sind in Abbildung 47 aufgetragen. Ein eindeutiger Zusammenhang ist auch hier nicht zu erkennen. Entgegen der ursprünglichen Annahmen nehmen die Abweichungen im Durchschnitt mit zunehmender Volumenzahl zunächst sogar ab, bevor sie wieder ansteigen. Eine Erklärung für die hohen Abweichungen bei der Volumenzahl 1 könnte sein, dass das Target im Vergleich zur Größe des Gesamtkörpers relativ ausgedehnt ist (etwa 10% der Gesamtgröße) und somit möglicherweise ein merklicher Dosisgradient innerhalb des Körpers besteht. Bei den Satellitenmodellen mit 10 und 100 Volumina ist dagegen erstens die Targetausdehnung im Vergleich zum Gesamtobjekt kleiner und zweitens mittelt sich aufgrund unterschiedlicher Positionen die Abweichung im Durchschnitt heraus. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die bloße Anzahl an Volumen keinen eindeutigen Einfluss auf die Abweichung hat.

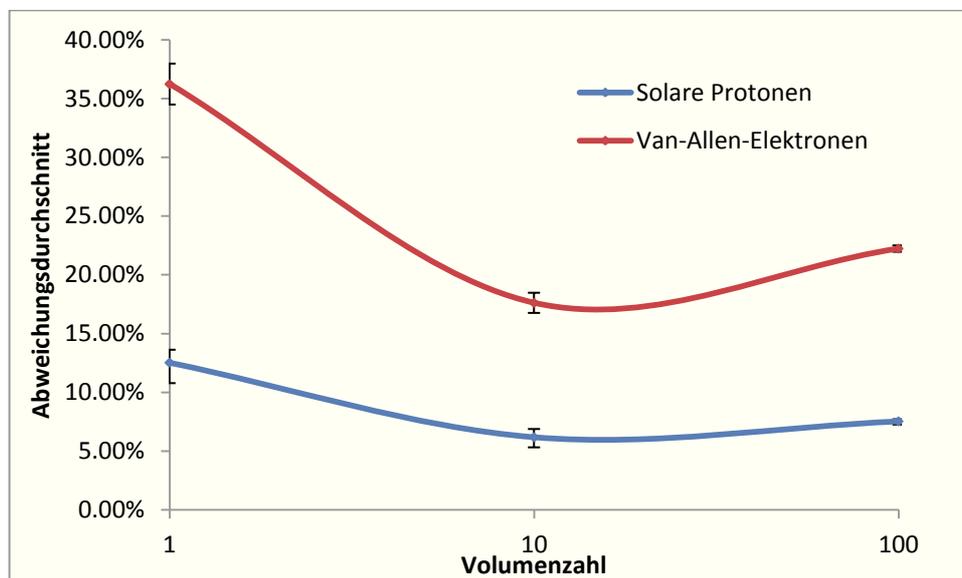


Abbildung 47: Die durchschnittlichen Abweichungsbeträge bei verschiedenen Satellitenmodellen in Abhängigkeit der Volumenzahl.

5.4.4 Analyse der Ursachen für Abweichungen

Bei der Analyse der Ursachen der teilweise enormen Abweichungen beim detaillierten Satellitenmodell konnten die im Folgenden dargestellten Einflüsse identifiziert werden.

5.4.4.1 Targetabmessungen

Einen großen Einfluss auf die Ergebnisse einer Dosissimulation können die Targetabmessungen haben. Dies wird beim Blick auf die Definition der absorbierten Energiedosis (siehe Gleichung (13)) sofort deutlich: die Energiedosis ist die pro infinitesimalem Massenelement absorbierte Energiemenge. Diese Größe kann also bei entsprechender Ausdehnung des Targetkörpers lokal erhebliche Unterschiede aufweisen, die sich dann entsprechend auf die Ergebnisse des jeweiligen Verfahrens auswirken. Die Abweichung beider Verfahren beruht dann auf den folgenden Zusammenhängen: In der Sektoranalyse wird die Dosis für einen definierten Punkt über die dreidimensionale Massenverteilung und die Tiefendosiskurve

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

berechnet. In der Monte-Carlo-Simulation, hier GRAS, wird die tatsächlich in einem definierten Volumen deponierte Energiemenge gemessen, die sich in der Dosisberechnung gleichmäßig auf die gesamte Masse des Volumens verteilt. Somit können je nach Ausdehnung des Targets erhebliche Unterschiede im jeweiligen Ergebnis entstehen, obwohl beide Verfahren für sich genommen korrekt funktioniert haben.

Deutlich wird dieser Umstand beim Vergleich der Abweichungen für die verschiedenen Bauteile des maximal komplexen Satelliten, die in Abbildung 48 zu sehen sind. Für beide Teilchensorten weichen die Ergebnisse im Durchschnitt am meisten für Bauteil 3 voneinander ab. Insbesondere der Unterschied von Bauteil 3 zu Bauteil 4 zeigt, dass allein die größere Dicke von Bauteil 3 (5 mm gegenüber 1 mm bei Bauteil 4) bei ansonsten identischen Maßen zu erheblichen Unterschieden in den Ergebnissen führt. Die starke Selbstabschirmung des dicken Bauteils 3 setzt die für das gesamte Volumen gemessene Energiedosis so stark herab, dass sie um teilweise viele 100% von der Sektoranalysendosis, die ohne das Targetvolumen gemessen wurde, abweicht.

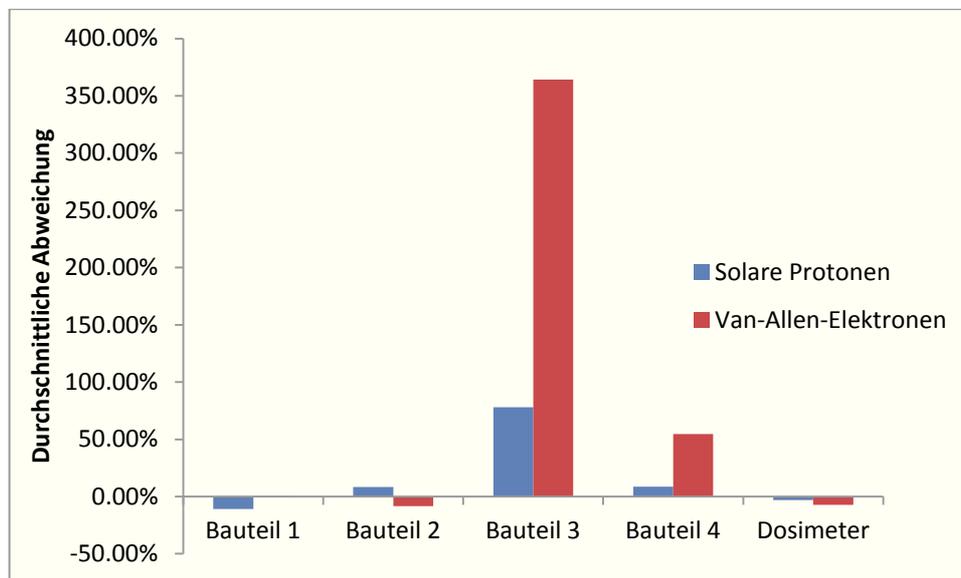


Abbildung 48: Die durchschnittliche Abweichung der einzelnen Bauteilerggebnisse.

5.4.4.2 Lokale Komplexität

Bei genauer Analyse der Abweichungen der Bauteile des maximal-komplexen Satelliten zeigt sich zudem, dass die Ausmaße des Targetvolumens durch einen weiteren Zusammenhang zu großen Unterschieden führen können. Liegt lokal eine hohe Komplexität der direkten Umgebung des Targets vor, kann die Dosis innerhalb eines ausgedehnten Targets wie z.B. Bauteil 1 stark variieren.

Ein Beispiel für diese im beobachteten Modell häufiger auftretende Konstellation ist in Abbildung 49 zu sehen. In diesem Fall befindet sich jeweils eine Belegung der Platine auf der Vorder- und auf der Rückseite. Dadurch ergibt sich, dass Teile des Messvolumens wesentlich stärker exponiert sind als andere, insbesondere wenn man die Tantalabschirmung auf dem Bauteil 1 im Vordergrund (in der Abbildung grün) bedenkt, die den Teilchenfluss auf das Target massiv reduziert. Dies führt dazu, dass sich je nach Messpunkt bei der Sektoranalyse lokal wesentlich höhere bzw. niedrigere Dosen ergeben können.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

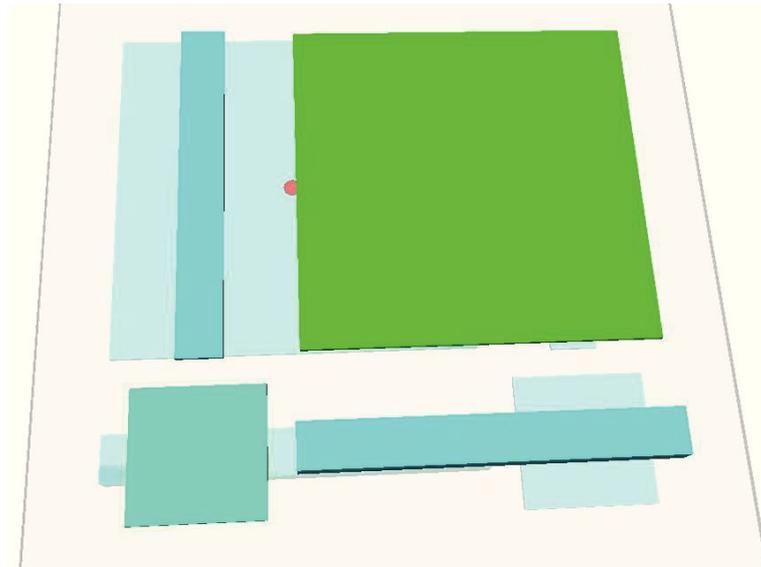


Abbildung 49: Die Detektoren der Instrumentenbox 4_3 auf der 2. Platine (4_3_2). Im Vordergrund sind die Bauteile der Position 4_3_2_V und im Hintergrund die von 4_3_2_H. Der rote Punkt ist der Mittelpunkt des Bauteils 1, in dem die Dosis gemessen wurde.

5.4.4.3 Seitliche Exposition eines flächigen Detektors

Eine weitere Besonderheit, die offenbar zu starken Abweichungen führen kann, ist die seitliche Exposition eines flächigen Bauteils. Identifiziert wurde dieser Zusammenhang für mehrere Positionen beim Bauteil 1, das nach oben (Tantalplättchen) und unten (Platine, Bauteile auf der Unterseite) abgeschirmt ist. Wenn durch Position im Satelliten dann die Haupteinfallrichtung seitlich zur Platine liegt, werden die Ränder erheblich stärker belastet als die Mitte. Berechnet man dann die Dosis mit der Sektoranalyse im Mittelpunkt des Targets, ergeben sich mitunter deutliche Untertreibungen zum Wert der tatsächlich deponierten Energie aus der Monte-Carlo-Simulation.

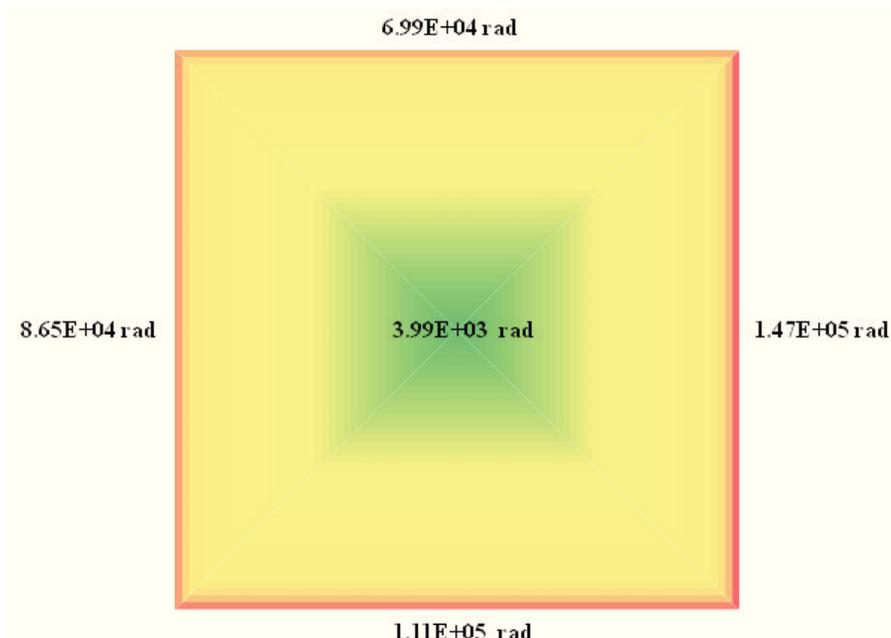


Abbildung 50: Die unter Verwendung der Tiefendosiskurve abgeschätzte Dosisverteilung im Bauteil 1 auf Position 4_2_1_VO. Die Zahlenwerte repräsentieren die mit Sektoranalysen am jeweiligen Ort gemessenen Dosen, die Farbe illustriert die lokale Dosisbelastung von hoch (rot) bis niedrig (grün).

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Beispielhaft zu sehen ist die farblich hervorgehobene Dosisverteilung in Abbildung 50 für das Bauteil 1 auf der Position 4_2_1_VO. Hierfür wurden die Dosiswerte am Mittelpunkt der Ränder sowie in der Mitte des Siliziumvolumens mit der Sektoranalyse berechnet und dann der Dosisabfall zur Mitte hin unter Verwendung der Tiefendosiskurve approximiert. Deutlich wird die starke seitliche Belastung des Bauteils und der starke Gradient, die letzten Endes zur großen Abweichung von in diesem Fall -62,52 (+/- 4,57) % führt.

5.4.4.4 Dosis durch gestreute Elektronen

Ein physikalisches Problem bei der Sektoranalyse besteht in der zufälligen Streuung der Teilchen beim Durchgang eines Körpers. Dabei kann man bei Protonen, deren Masse im Verhältnis zu den Gitterelektronen sehr groß ist, von einem näherungsweise geradlinigen Durchgang ausgehen. Elektronen werden dagegen stark gestreut und verlieren im Allgemeinen ihre Richtungsinformation. Dieses Verhalten wird bei der Sektoranalyse vernachlässigt. Bei einigermaßen gleichmäßig verteilter Abschirmung ist die Abweichung durch diesen Effekt tolerierbar, aber bei einer ungünstigen geometrischen Anordnung kann die durch Sektoranalyse berechnete Dosis erheblich unter dem tatsächlichen Wert liegen. Ein Beispiel für so eine Anordnung gibt Abbildung 51.

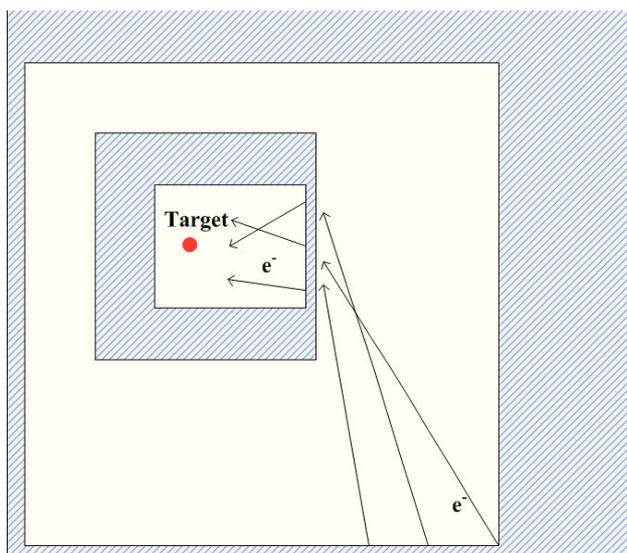


Abbildung 51: Beispiel einer Anordnung, bei der durch die vernachlässigte Elektronenstreuung die Sektoranalyse die tatsächliche Dosis erheblich unterschätzt.

Die Sektoranalyse untersucht die vom Targetpunkt aus vorliegende Abschirmung für alle Raumwinkel und kommt für die dargestellte Anordnung zu dem Ergebnis, dass in allen Richtungen große Mengen an abschirmender Masse vorhanden sind. Ergo ergibt sich in Verbindung mit der Tiefendosiskurve eine niedrige Dosisbelastung. Tatsächlich aber ist die dünne Wandseite des Instrumentengehäuses stark exponiert und streut einen Teil der einfallenden Elektronen auf das Target. Diese Belastung kann unter Umständen sehr hoch sein und wird durch die Sektoranalyse nicht berücksichtigt. Eine vergleichbare Situation findet sich im detaillierten Satellitenmodell an den hinteren Positionen 4_2_2 und 5_3.

5.5 Korrektur der stark abweichenden Ergebnisse des komplexen Satellitenmodells durch Detailanalyse

Da für die verschiedenen Satellitenmodelle unterschiedlicher Komplexität mit Ausnahme des detaillierten Modells keine großen Abweichungen gefunden werden konnten, scheint die Qualität der Ergebnisse der Sektoranalysemethode grundsätzlich zufriedenstellend zu sein. Für die großen Abweichungen beim maximalkomplexen Modell für Elektronendosen konnten verschiedene Ursachen gefunden werden (siehe Abschnitt 5.4.4). Versteht man diese Gründe, ist es auch möglich, Korrekturwerte durch Detailanalysen der entsprechenden Objekte zu gewinnen, die den tatsächlichen Werten aus der Monte-Carlo-Simulation nahekommen.

5.5.1 Bauteil 1

5.5.1.1 Besonderheiten

Bei Bauteil 1 handelt es sich um ein flächig ausgedehntes Siliziumtarget ($78 \times 78 \times 1 \text{ mm}^3$), das sich direkt auf der jeweiligen Platine (1,5 mm stark aus Epoxid in der Ausdehnung des Innenraums der jeweiligen Instrumentenbox) befindet. Es ist durch das Polyethylengehäuse und die unterliegende Epoxidplatine nach allen Seiten ummantelt und besitzt zusätzlich noch eine Extraabschirmung aus Tantal nach oben hin.

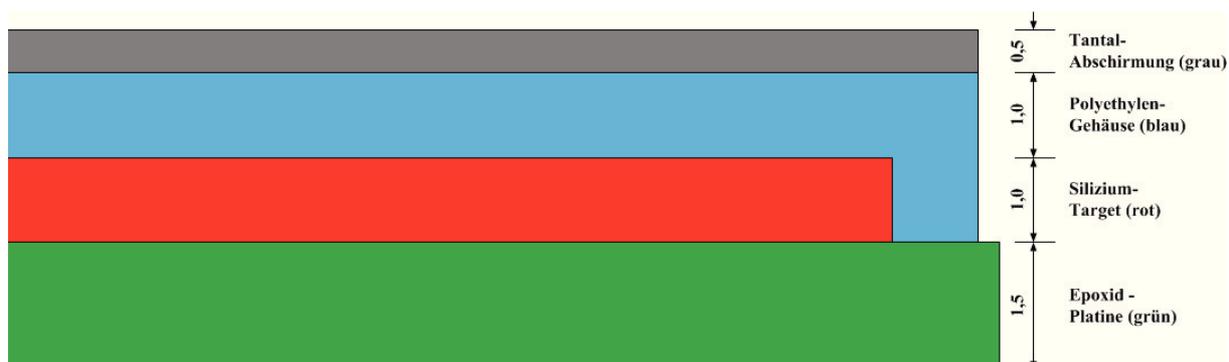


Abbildung 52: Seitliche Abmessungen und Aufbau des Bauteils 1 mit Abmessungen in mm.

Durch die massive Abschirmung mit 0,5 mm Tantal, das bei gleicher Massenbelegung etwa 3 mm Aluminium entspricht, sind die Ränder des empfindlichen Volumens besonders exponiert. Dieser Effekt kann sich durch die Ausrichtung relativ zum Satelliten noch verstärken, wenn die Haupteinfallrichtung der Strahlung ebenfalls seitlich ist. Dadurch ergibt sich, dass die mit der Sektoranalyse im Mittelpunkt berechnete Dosis (ohne Targetvolumen) deutlich niedriger ausfallen kann, als die Monte-Carlo-Dosis fürs gesamte Targetvolumen.

5.5.1.2 Korrekturmethode: Randwertanalyse

Die spezielle Beschaffenheit des abgeschirmten Bauteils 1 führt zu teilweise erheblich höheren Dosisbelastungen der Randbereiche als in der Mitte. Daher besteht die Grundidee aus der Messung der Dosen an den Rändern und in der Mitte und der anschließenden Integration über das Gesamtvolumen. Die Dosis wird dann für jeden der vier Sektoren, die in Abbildung 53 zu sehen sind, errechnet und gemittelt. Da die Dosis eine Funktion des Volumens ist und dieses von der Mitte nach außenhin zunimmt, muss dieses in der Integration berücksichtigt werden. Der Ansatz lautet dann:

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

$$D_S = \int_V D(s) \frac{1}{V_S} dV \quad (20)$$

mit der gemittelten Dosis des Sektors D_S , der Dosisfunktion in Abhängigkeit des Abstands zur Mitte $D(s)$ und dem Sektorvolumen V_S .

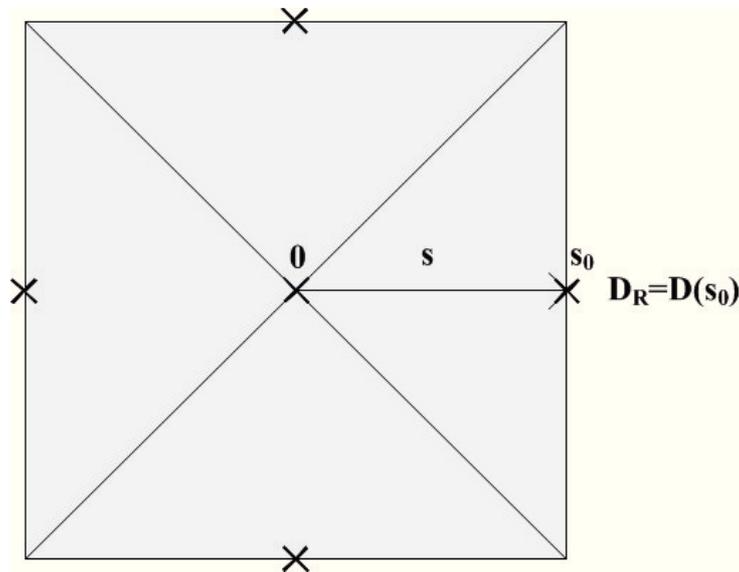


Abbildung 53: Die Dosismesspunkte von Bauteil 1 befinden sich an den markierten Rändern und in der Mitte. Zur Dosisermittlung für das gesamte Volumen wird von der Mitte ($s=0$) bis zum Rand ($s=s_0$) integriert.

Geht man davon aus, dass die Dosis vor allem von Teilchen verursacht wird, die seitlich in das Target eindringen, muss man davon ausgehen, dass die Dosis zur Mitte hin wie in der Tiefendosiskurve abfällt. Dieser Abfall erfolgt etwa exponentiell (siehe Abschnitt 5.4.1), wobei sich drei Steigungsbereiche unterscheiden lassen. Der erste Bereich geht bis zu einer Tiefe von 0,3 mm, der zweite von 0,3 bis 7 mm und der dritte von 7 mm bis ins (theoretisch) Unendliche. Da das Dosisniveau an den Rändern des Targets (durch die Struktur des Satelliten und Instrumentengehäuse) deutlich unter dem 0,3 mm Abschirmtiefe entsprechenden liegt, ist der erste Bereich für die hier betrachteten Fälle irrelevant. Der zweite, steil abfallende Bereich bis 7 mm und der Dritte treten aber häufig auf, weswegen Dosisfunktion $D(s)$ im einen Fall über einen und im anderen Fall über zwei Bereiche integriert wird. Als Grenze wird hierfür eine Grenzdosis D_G definiert, die der Steigungsänderung bei 7 mm Tiefe in der Tiefendosiskurve entspricht und im konkreten Fall 9.000 rad entspricht.

Randdosis D_R kleiner als Grenzdosis D_G

Ist die am Rand gemessene Dosis D_R kleiner als die Grenzdosis D_G , fällt die Dosis mit der Tiefe gleichmäßig ab und die Dosisfunktion ist über den gesamten Integrationsbereich dieselbe. Mit dem Ansatz einer Exponentialfunktion

$$D(s) = a \cdot e^{bs}$$

und den Randbedingungen

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

$$D(0) = D_M \quad \text{und} \quad D(s_0) = D_R$$

ergeben sich die Parameter

$$a = D_M \quad \text{und} \quad b = \frac{1}{s_0} \ln \frac{D_R}{D_M}$$

und damit die Funktion:

$$D(s) = D_M \cdot e^{bs} \quad (21)$$

Mit dieser Dosisfunktion, der Einsetzung des Sektorvolumens (mit der Dicke d des Targets) und der Ersetzung von dV mit ds kann die Integration von Gleichung (20) durchgeführt werden und ergibt für die gemittelte Dosis des gesamten Sektors

$$D_S = \int_V D(s) \frac{1}{V_S} dV = \int_0^{s_0} D(s) \frac{d \cdot 2s}{s_0^2 d} ds = \frac{2}{s_0^2 b^2} [D_R (s_0 b - 1) + D_M] \quad (22).$$

Randdosis D_R größer als Grenzdosis D_G

Ist die Dosis am Rand größer als die Grenzdosis, fällt sie zur Mitte des abgeschirmten Targets zunächst sehr stark bis auf etwa die Grenzdosis ab. Ab der Grenzdosis ist die Abnahme dann bis zur Mitte hin schwächer. Der Ansatz zur Beschreibung dieses Sachverhalts ist derselbe wie beim ersten Fall mit dem Unterschied, dass sich die Formel der Funktion bei der Grenzdosis D_G , die dem Abstand s_G entspricht, ändert. Der Ansatz lautet wieder

$$D(s) = a \cdot e^{bs}$$

mit den Randbedingungen

$$D_I(0) = D_M, \quad D_{II}(s_0) = D_R \quad \text{und} \quad D_I(s_G) = D_{II}(s_G) = D_G,$$

wobei D_I die Dosis im inneren und D_{II} im äußeren Bereich des Targets angibt. So werden die Parameter zu

$$a_I = D_M, \quad a_{II} = D_G, \quad b_I = \frac{1}{s_G} \ln \frac{D_G}{D_M} \quad \text{und} \quad b_{II} = \frac{1}{s_0 - s_G} \ln \frac{D_R}{D_G}$$

und die Dosisfunktion lautet

$$D(s) = \begin{cases} D_M e^{b_I s} & \text{für } s \in [0, s_G] \\ D_G e^{b_{II}(s - s_G)} & \text{für } s \in [s_G, s_0] \end{cases} \quad (23)$$

Die Integration über das Sektorvolumen ergibt analog zum ersten Fall (siehe Gleichung) die gemittelte Sektordosis:

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

$$D_S = \int_0^{s_0} D(s) \frac{2s}{s_0^2} ds = \frac{2}{s_0^2} \left\{ \frac{1}{b_I} [D_G(s_G b_I - 1) + D_M] + \frac{1}{b_{II}} [D_R(s_0 b_{II} - 1) - D_R(s_G b_{II} - 1)] \right\} \quad (24)$$

Die zugehörigen Grenzabstände s_G müssen aus dem Tiefenabstand Δs der Randdosis in den Tiefendosisdaten zur Grenzdosise (hier bei 7 mm) ermittelt werden und sind dann $s_G = s_0 - \Delta s$, wobei das Material des Targets im Vergleich zu Aluminium berücksichtigt werden muss. Beträgt im Fall der hier verwendeten Tiefendosis Kurve (siehe Abbildung 44) beispielsweise die Randdosis 70 krad (entsprechend 5 mm Abschirmung), so beträgt Δs bis zur Grenzdosise von hier 9 krad (bei 7 mm Abschirmung) 2 mm. Berücksichtigt man auch noch das unterschiedliche Material, kann man Δs auch noch mit den entsprechenden Dichten über den Quotienten $\rho_{\text{Target}}/\rho_{\text{Tiefendosis Kurve}}$ normieren.

Mit den so gewonnenen Sektorwerten lässt sich dann die gemittelte Gesamtdosis einfach aus dem Mittelwert errechnen.

5.5.1.3 Ergebnisse

Zunächst werden die Ergebnisse begutachtet (siehe Tabelle 25) und die stark abweichenden Positionen untersucht. Als stark abweichend werden Unterschiede mit einem Faktor zwei zwischen den Werten definiert, was nach der hier verwendeten Abweichungsdefinition (Gleichung (18)) Abweichungen von unter -50% bzw. über +100% entspricht. Die ermittelten Positionen und die jeweiligen Abweichungen sind in Tabelle 26 aufgetragen.

Tabelle 26: Die jeweiligen Positionen, an denen für Bauteil 1 eine starke Abweichung festgestellt wurde.

Target-Position	Abweichung	Unsicherheit	Erklärung für starke Abweichung
4-1_OV	-58.62%	7.77%	Seitliche Exposition
4_2_1_VO	-62.52%	4.57%	Evtl. seitliche Exposition
4_2_1_VU	-56.18%	5.04%	Seitliche Exposition
4_2_2_VU	-69.42%	4.23%	Seitliche Exposition
4_3_2_H	147.33%	30.57%	Komplexe Gegenseite + seitliche Exposition
5_1_V	-62.40%	4.00%	Evtl. seitliche Exposition
5_3_VO	-64.54%	4.11%	Evtl. seitliche Exposition
5_3_VM	-65.45%	3.96%	Evtl. seitliche Exposition

Für alle stark abweichenden Positionen außer 4_3_2_H lag die Dosis aus der Sektoranalyse unter dem Wert der Monte-Carlo-Simulation. Dies untermauert die These, dass durch die Abschirmung die Dosis in der Mitte erheblich unter der am Rand liegt und damit auch unter der (gemittelten) der Monte-Carlo-Simulation. Bei 4_3_2_H liegt neben der stärkeren Belastung der Seiten auch noch eine komplexe Platinegegenseite, die stark exponiert ist, vor, was zur hohen Abweichung beiträgt.

Mit der in Abschnitt 5.5.1.2 beschriebenen Methode wurden korrigierte Werte für die einzelnen Positionen berechnet. Die Abweichungen der errechneten Dosen von den Monte-Carlo-Werten sind in Tabelle 27 zu sehen. Für alle Positionen liegen die Abweichungen nach der Detailuntersuchung im als tolerierbar eingestuften Abweichungsbereich von -50% bis +100%.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Tabelle 27: Die Abweichungen der korrigierten Dosiswerte im Vergleich mit den ursprünglichen Abweichungen.

Target-Position	Ursprüngliche Messung		Korrigierte Werte mit Randdosen	
	Abweichung	Unsicherheit	Abweichung	Unsicherheit
4-1_OV	-58.62%	7.77%	-23.20%	15.18%
4_2_1_VO	-62.52%	4.57%	-24.86%	21.20%
4_2_1_VU	-56.18%	5.04%	36.36%	22.83%
4_2_2_VU	-69.42%	4.23%	-31.05%	17.75%
4_3_2_H	147.33%	30.57%	-12.18%	12.61%
5_1_V	-62.40%	4.00%	-42.73%	16.61%
5_3_VO	-64.54%	4.11%	-35.30%	21.12%
5_3_VM	-65.45%	3.96%	-40.99%	18.69%

Um die Methode allgemein zu validieren wurde das Verfahren auch noch für drei andere Positionen, deren ursprüngliche Abweichung im tolerierbaren Rahmen war, getestet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 28 eingetragen. Auch hier liegen sämtliche Korrekturwerte innerhalb des tolerablen Bereichs, auch wenn sich ein Wert (4_1_OH) etwas verschlechtert hat.

Tabelle 28: Korrigierte Dosen von Detektorpositionen, deren ursprüngliche Abweichung im Toleranzbereich lag.

Target-Position	Ursprüngliche Messung		Korrigierte Werte mit Randdosen	
	Abweichung	Unsicherheit	Abweichung	Unsicherheit
4_1_OH	54.34%	32.41%	67.22%	37.55%
4_3_2_V	-44.12%	8.04%	-37.38%	11.59%
5_3_VU	-34.95%	7.27%	-31.89%	28.06%

Die Korrektur von Sektoranalysewerten ist bei komplexen Bauteilen mit Abschirmung wie Bauteil 1 also möglich. Insbesondere erlaubt die Messung an mehreren Positionen ein genaueres Verständnis der lokalen Belastung des empfindlichen Volumens und Belastungsspitzen, z.B. am Rand.

5.5.2 Bauteil 2

5.5.2.1 Besonderheiten

Bauteil 2 ist wie Bauteil 1 quadratisch (28 mm x 28 mm x 1 mm) und in ein 1 mm starkes Polyethylengehäuse eingelassen. Es besteht wie alle betrachteten Bauteile aus Silizium und sitzt direkt auf der Platine. Im Gegensatz zu Bauteil 1 existiert hier keine Extraabschirmung, weshalb grundsätzlich von allen Seiten ein bedeutender Teilchenstrom zum Target möglich ist.

5.5.2.2 Korrekturmethode: Segmentanalyse

Die Analyse der Abweichungen des zweiten Bauteils führt zur Erkenntnis, dass in 7 von 8 Fällen starker Abweichung die teilweise erhebliche Differenz (im Extremfall bei Position

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

4_2_2_HU -97,5%, was einem Faktor von über 40 entspricht!) durch die unregelmäßige Abschirmung durch die Gegenseite verursacht wird. So befindet sich in diesen Fällen immer das Bauteil 3 der Gegenseite quer über Bauteil 2 in Richtung der Hauptexposition, was in Abbildung 49 gut zu erkennen ist. So ist der Messpunkt der Sektoranalyse in der Mitte von Bauteil 2 stark abgeschirmt, während der äußere Bereich des Bauteils dies nicht ist.

Zur Korrektur eignet sich in einem solchen Fall die Messung über ein Raster an gleich verteilten Gitterpunkten. Jede diese Messungen im Zentrum eines Segments, in das das Volumen aufgeteilt wird, repräsentiert den Dosiswert dieses Segments. Der Mittelwert ergibt dann die Dosis für das Gesamtvolumen.

5.5.2.3 Ergebnisse

Alle Positionen mit starken Abweichungen für Bauteil 2 sind in Tabelle 29 eingetragen. Als Erklärung für die starken Abweichungen nach unten stößt man immer auf die Struktur der Gegenseite, die einen Teil des Targets in der Hauptexpositionsrichtung stark abschirmt. Nur bei Position 4_1_OH existiert auf der Gegenseite keine Struktur. Die Beschaffenheit der Instrumentenkiste 4_1 durch massives Aluminium oberhalb und unterhalb der Platine sorgt jedoch für eine ausgeprägte seitliche Exposition (siehe Abbildung 54).

Tabelle 29: Die jeweiligen Positionen, an denen für Bauteil 2 eine starke Abweichung festgestellt wurde.

Target-Position	Abweichung	Unsicherheit	Erklärung für starke Abweichung
3_2_O	-66.13%	2.80%	Struktur der Gegenseite
4_1_OH	101.51%	36.29%	Seitliche Exposition
4_2_2_HO	-92.25%	1.19%	Struktur der Gegenseite
4_2_2_HU	-97.51%	0.37%	Struktur der Gegenseite
5_1_H	-84.55%	1.48%	Struktur der Gegenseite
5_3_HO	-96.67%	0.34%	Struktur der Gegenseite
5_3_HM	-96.59%	0.36%	Struktur der Gegenseite
5_3_HU	-87.75%	1.20%	Struktur der Gegenseite

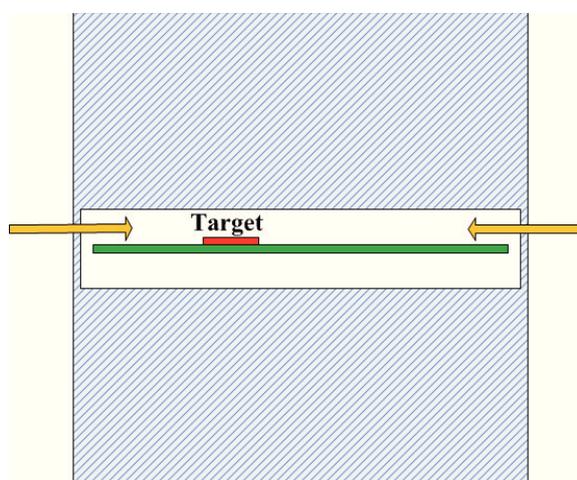


Abbildung 54: Besondere Lage der Targets in der Instrumentenbox 4_1: weil die Kiste oben und unten massiv Aluminium enthält, kommt die Exposition hauptsächlich von den Seiten.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Die Korrekturen wurden dann nach der in 5.5.2.2 beschriebenen Segmentmethode durchgeführt. Dazu wurde das Target, wie in Abbildung 55 dargestellt, in 9 Segmente unterteilt und in der Mitte jedes dieser Segmente die Dosis bestimmt.

2	3	4
5	1	6
7	8	9

Abbildung 55: Unterteilung von Bauteil 2 in 9 gleich große Segmente, in deren Zentren die Dosis bestimmt wurde.

Die Ergebnisse nach dieser Behandlung sind in Tabelle 30 zu sehen.

Tabelle 30: Die Ergebnisse von Bauteil 2 nach der Korrektur mit der Segmentmethode.

Target-Position	Ursprüngliche Messung		Korrigierte Werte mit Segmentdosen	
	Abweichung	Unsicherheit	Abweichung	Unsicherheit
3_2_O	-66.13%	2.80%	14.21%	9.39%
4_1_OH	101.51%	36.29%	214.50%	54.20%
4_2_2_HO	-92.25%	1.19%	-14.25%	13.07%
4_2_2_HU	-97.51%	0.37%	-52.63%	6.96%
5_1_H	-84.55%	1.48%	10.63%	10.20%
5_3_HO	-96.67%	0.34%	7.39%	10.26%
5_3_HM	-96.59%	0.36%	19.13%	12.04%
5_3_HU	-87.75%	1.20%	10.57%	10.65%

Bis auf Position 4_1_OH, wo die Abweichung eine andere Ursache hat, und Position 4_2_2_HU, wo der korrigierte Wert nur knapp außerhalb des als stark abweichend definierten Korridors liegt, stimmen die korrigierten Werte sehr gut mit den Monte-Carlo-Dosen überein.

Da bei Position 4_1_OH die Abweichung offensichtlich eine andere Ursache, nämlich die seitliche Exposition hat, wurde für dieses Bauteil die Dosis mit der Randwertmethode aus 5.5.1.2 berechnet. Es ergibt sich dann eine Abweichung nach unten von -42,32 (+/- 9,67)%. Die Randwertmethode funktioniert hier also aufgrund ähnlicher Bedingungen befriedigend.

Zur Validierung wurden auch Positionen mit der Segmentmethode untersucht, deren Abweichung bereits akzeptabel war. Die Ergebnisse sind in Tabelle 31 zu sehen. Die Abweichung ist zwar teilweise höher als vorher, bewegt sich aber durchweg innerhalb des tolerierbaren Bereichs. Eine Verschlechterung durch die Methode ist grundsätzlich immer möglich, da sie sehr einfach gehalten wurde. Um noch exaktere Ergebnisse zu erhalten ist eine weitere Aufteilung in eine größere Anzahl von Segmenten möglich.

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

Tabelle 31: Korrigierte Dosen von Detektorpositionen, deren Abweichung ursprünglich im Toleranzbereich lag.

Target-Position	Ursprüngliche Messung		Korrigierte Werte mit Segmentdosen	
	Abweichung	Unsicherheit	Abweichung	Unsicherheit
4_1_OV	32.68%	20.30%	75.67%	26.67%
4_2_1_VO	52.52%	12.00%	52.13%	11.97%
8_4_1_H	-18.57%	10.99%	58.69%	20.95%

Als Fazit ergibt sich, dass es auch bei lokal hoher Komplexität der Umgebung also durch Detailanalyse möglich ist, Gesamtdosen zuverlässig zu ermitteln.

5.5.3 Bauteil 3

5.5.3.1 Besonderheiten

Die Besonderheit von Bauteil 3 liegt im Wesentlichen in seiner vergleichsweise großen Dicke von 5 mm. Damit kann es wegen seiner Ausdehnung (10 mm x 80 mm x 5 mm) auch nicht mehr als "flächig" bezeichnet werden, sondern als quaderförmig und "länglich". Durch die Länge entstehen durch die direkte Umgebung unterschiedliche Dosisniveaus an verschiedenen Stellen des Targets, die zu Abweichungen führen können. Wesentlich stärkere Auswirkung kann aber bei Ansicht der Ergebnisse der Massivität durch die hohe Dicke zugeordnet werden. Diese führt bei einer Messung ohne die Berücksichtigung der Targetmasse zu großen Übertreibungen, weil die starke Selbstabschirmung nicht berücksichtigt wird. Im Falle einer Messung mit der Masse wäre die gemessene Dosis im Zentrum des Körpers dagegen erheblich unterschätzt, da an der Oberfläche des Körpers deutlich höhere Belastungen auftreten.

5.5.3.2 Korrekturmethode: Randwertanalyse in 3 Dimensionen

Um die exponentielle Abnahme der Dosis mit zunehmender Tiefe beschreiben zu können, empfiehlt sich hier ein Vorgehen wie in Abschnitt 5.5.1.2. Allerdings kann Bauteil 3 aufgrund seiner Dicke nicht mehr als flach angenommen werden, weshalb die Randwertanalyse hierfür dreidimensional betrachtet werden muss (siehe Abbildung 56). Wie in der zweidimensionalen Methode müssen auch hier zwei Fälle unterschieden werden.

Randdosis D_R kleiner als Grenzdosis D_G

Ist die am Rand gemessene Dosis D_R kleiner als die Grenzdosis D_G (oder die in der Mitte des Körpers gemessene Dosis D_M größer als D_G), fällt die Dosis mit der Tiefe gleichmäßig ab und die Dosisfunktion ist über den gesamten Integrationsbereich dieselbe. Mit dem Ansatz aus Abschnitt 5.5.1.2 ergibt sich auch hier für die Dosisfunktion in Abhängigkeit vom Abstand von der Mitte s

$$D(s) = D_M \cdot e^{bs} \quad \text{mit} \quad b = \frac{1}{s_0} \ln \frac{D_R}{D_M} .$$

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

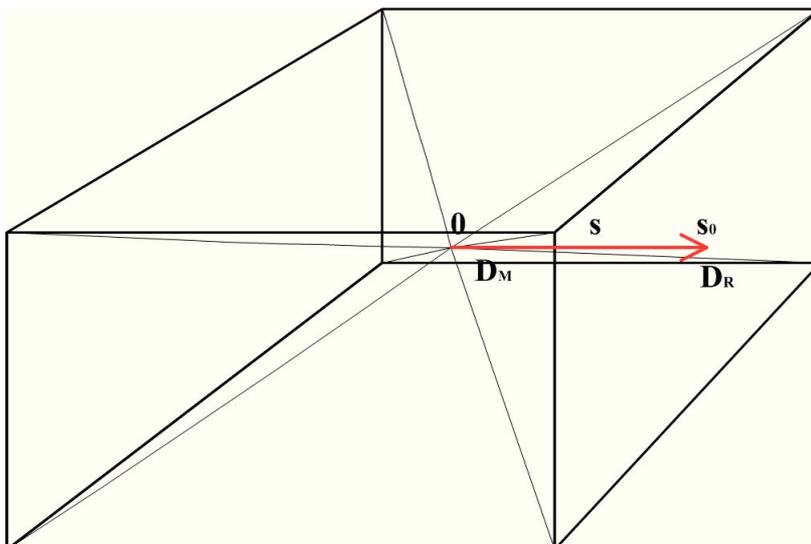


Abbildung 56: Die Randwertmethode in drei Dimensionen funktioniert analog zu der in einer Dimension. Die Randdosis wird in der Mitte der Seitenflächen gemessen.

Mit der Integration von Gleichung (20) kann die über das Sektorvolumen V_S gemittelte Sektordosis D_S berechnet werden. Diese Integration ergibt:

$$D_S = \int_V D(s) \frac{1}{V_S} dV = \int_0^{s_0} D(s) \frac{3}{s_0^3} s^2 ds = \frac{3}{s_0^3} \left[D_R \left(\frac{s_0^2}{b} - \frac{2s_0}{b^2} + \frac{2}{b^3} \right) - \frac{2D_M}{b^3} \right] \quad (25).$$

So können die mittleren Dosen für alle Sektoren berechnet und danach für das Gesamtvolumen gemittelt werden. Eine Gewichtung ist übrigens nicht notwendig, denn alle Sektoren sind bei einer derartigen Anordnung immer gleich groß.

Randdosis D_R größer als Grenzdosis D_G

Ist die Dosis am Rand größer (und die Dosis in der Mitte kleiner) als die Grenzdosis, fällt sie zur Mitte des abgeschirmten Targets zunächst sehr stark bis auf etwa die Grenzdosis ab. Ab der Grenzdosis ist die Abnahme dann bis zur Mitte hin schwächer. Der Ansatz zur Beschreibung dieses Sachverhalts ist derselbe wie beim ersten Fall mit dem Unterschied, dass sich die Formel der Funktion bei der Grenzdosis D_G , die dem Abstand s_G entspricht, ändert. Der Ansatz entspricht dem von Abschnitt 5.5.1.2 und ergibt dieselbe Dosisfunktion in Abhängigkeit des Abstands s von der Mitte

$$D(s) = \begin{cases} D_M e^{b_I s} & \text{für } s \in [0, s_G] & \text{mit } b_I = \frac{1}{s_G} \ln \frac{D_G}{D_M} \\ D_G e^{b_{II}(s-s_G)} & \text{für } s \in [s_G, s_0] & \text{mit } b_{II} = \frac{1}{s_0 - s_G} \ln \frac{D_R}{D_G} \end{cases}$$

Die Integration über das Sektorvolumen ergibt analog zum ersten Fall die gemittelte Sektordosis:

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

$$D_S = \int_0^{s_0} D(s) \frac{3}{s_0^3} s^2 ds =$$

$$= \frac{3}{s_0^3} \left\{ D_G \left[s_G^2 \left(\frac{1}{b_I} - \frac{1}{b_{II}} \right) - 2s_G \left(\frac{1}{b_I^2} - \frac{1}{b_{II}^2} \right) + 2 \left(\frac{1}{b_I^3} - \frac{1}{b_{II}^3} \right) \right] - D_M \frac{2}{b_I^3} + D_R \left(\frac{s_0^2}{b_{II}} - \frac{2s_0}{b_{II}^2} + \frac{2}{b_{II}^3} \right) \right\} \quad (26)$$

Die zugehörigen Grenzabstände s_G müssen aus dem Tiefenabstand Δs der Randdosis in den Tiefendosisdaten zur Grenzdosis (hier bei 7 mm) ermittelt werden und sind $s_G = s_0 - \Delta s$, wobei das Material des Targets im Vergleich zu Aluminium berücksichtigt werden muss. Mit den so gewonnenen Sektorwerten lässt sich dann die gemittelte Gesamtdosis einfach aus dem Mittelwert errechnen.

5.5.3.3 Ergebnisse

Bei Bauteil 3 war die Abweichung auf allen Positionen bis auf zwei (4_2_2_HO und 4_3_2_V) sehr stark, und zwar in allen Fällen nach oben. Auch in den zwei Fällen, in denen der Unterschied als nicht stark abweichend eingestuft wird, liegen die Ergebnisse der Sektoranalysen über denen der Monte-Carlo-Methode, die in diesen Fällen möglicherweise zufällig ein sehr hohes Ergebnis ergeben haben.

Zum Test der dreidimensionalen Randwertanalyse wurde das Verfahren auf sechs Positionen angewandt, von denen fünf ursprünglich verschieden stark nach oben abweichen und eine (4_3_2_V) eine vergleichsweise geringe Abweichung von 36% hat. Die Ergebnisse dieser Detailanalysen sind in Tabelle 32 zu sehen.

Tabelle 32: Die Abweichungen der ursprünglichen Messungen sowie nach der Detailanalyse mit den Randdosen für Bauteil 3 an ausgewählten Positionen.

Target-Position	Ursprüngliche Messung		Korrigierte Werte mit Randdosen	
	Abweichung	Unsicherheit	Abweichung	Unsicherheit
4-1_OH	664.89%	120.25%	62.40%	27.55%
4_2_1_VO	287.02%	19.60%	-1.72%	4.99%
4_2_2_HU	182.84%	32.69%	-23.21%	9.43%
5_3_HM	179.92%	22.63%	-34.30%	5.90%
8_4_1_V	964.87%	117.85%	70.38%	19.14%
4_3_2_V	36.02%	17.78%	-63.77%	5.18%

Es zeigt sich, dass die Korrekturmethode überwiegend gut funktioniert. Nur auf Position 4_3_2_V liegt die korrigierte Dosis etwas unter dem als akzeptabel eingestuften Bereich. Die Ursache dafür könnte darin liegen, dass der Monte-Carlo-Wert möglicherweise sehr hoch ausfällt, dann aufgrund dieser Eigenschaft mit dem Sektoranalysenwert gut übereinstimmt und deshalb zur Überprüfung der Detailanalyse herangezogen wurde. Da die angegebenen Fehler Standardabweichungen sind, ist die Möglichkeit für Ausreißer nach oben oder unten grundsätzlich immer in Betracht zu ziehen.

5.5.4 Bauteil 4

5.5.4.1 Besonderheiten

Bei Bauteil 4 handelt es sich um ein einfaches, rechteckiges Siliziumplättchen ohne Gehäuse und Abschirmung. Die Maße (80 mm x 10 mm x 1 mm) sind mit Ausnahme der Dicke genauso wie bei Bauteil 3. Bei der Konstellation, bei der vorne und hinten auf der Platine eine Belegung mit Targets angebracht ist, wird das komplette Bauteil von der Tantalabschirmung des gegenüberliegenden Bauteils 1 abgeschirmt, wobei der Rand mit dem der Abschirmung zusammenfällt. Dies kann zu einer etwas höheren Exposition an der Seite führen. Zudem ist durch die längliche Ausdehnung eine unterschiedliche Belastung möglich.

5.5.4.2 Ergebnisse und Korrektur mit der dreidimensionalen Randwertanalyse

Da Bauteil 4 kein Gehäuse und keine Abschirmung besitzt, ist es nach allen Seiten exponiert. Dazu kommt es durch die Ausdehnung vor allem an den Enden der langen Seiten zu unterschiedlichen Belastungen. Dadurch bietet sich als Korrekturmethode für die Ergebnisse der Bauteile 4 auf Positionen, die stark abweichen, die dreidimensionale Randwertanalyse aus Abschnitt 5.5.3.2 an. Die Ergebnisse sind in Tabelle 33 zu sehen.

Tabelle 33: Die Abweichungen der ursprünglichen Messungen sowie nach der Detailanalyse mit den Randdosen für Bauteil 4 an den stark abweichenden Positionen.

Target-Position	Ursprüngliche Messung		Korrigierte Werte mit Randdosen	
	Abweichung	Unsicherheit	Abweichung	Unsicherheit
4-1_OH	203.09%	46.99%	-36.13%	10.08%
4-1_OV	217.66%	40.59%	-6.07%	11.97%
4_2_2_HU	-96.25%	0.54%	-92.41%	1.08%
4_3_2_V	281.54%	57.40%	93.37%	28.96%
5_3_HO	-73.22%	3.84%	-83.16%	2.96%
5_3_HM	-56.99%	5.47%	-80.44%	3.07%
8_4_1_V	195.00%	35.37%	16.95%	14.02%
8_4_1_H	139.71%	31.37%	-15.79%	11.02%

Bei Betrachtung dieser Ergebnisse wird sichtbar, dass die Abweichungen hier zwei grundverschiedenen Ursachen haben müssen. Für fünf Positionen funktioniert die dreidimensionale Randwertanalyse gut und liefert Dosen im gewünschten Toleranzbereich (Faktor 2), während diese für die Positionen 4_2_2_HU, 5_3_HO und 5_3_HM nichts an der Abweichung nach unten ändert.

Die genaue Analyse der besonderen Situation dieser Messpunkte ergibt eine ähnliche Konstellation wie in Abbildung 51 in Abschnitt 5.4.4.4: die rundherum relativ massive Abschirmung ist für das dünne gegenüberliegende Instrumentenboxgehäuse nicht gegeben und dieses streut Elektronen zum Bauteil 2, die in der Sektoranalyse nicht berücksichtigt werden. Zustande kommt die große Abweichung an diesen Positionen bei Bauteil 4 im Vergleich zu den anderen Bauteilen an dieser Position vor allem dadurch, dass es nach vorne in Hauptexpositi-

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

onsrichtung durch die Tantalabschirmung besonders stark geschützt ist und sich die fehlende Streuelektronenbelastung dadurch stärker bemerkbar macht.

5.5.4.3 Korrekturmethode: Hilfsdosismessung zur Ermittlung von Belastungen durch gestreute Elektronen

Der grundlegende Gedanke der Methode der Hilfsdosismessung besteht darin, die Dosis direkt hinter der streuenden Fläche orthogonal zum Bauteil zu messen und dann die Abnahme dieser Dosis entlang der Linie des Hilfsdosismesspunkts zur Position des Bauteils zu berechnen. Dies setzt folgende Annahmen voraus:

- Die ursprüngliche Richtungsinformation geht beim Durchgang der Elektronen durch die dünne, streuende Wand verloren, d.h. dahinter sind die Richtungen der Elektronen zufällig verteilt.
- Die an dem Hilfsdosispunkt gemessene Dosis ist korrekt.

Die geometrische Skizze der Anordnung sieht dann aus wie in Abbildung 57 zu sehen.

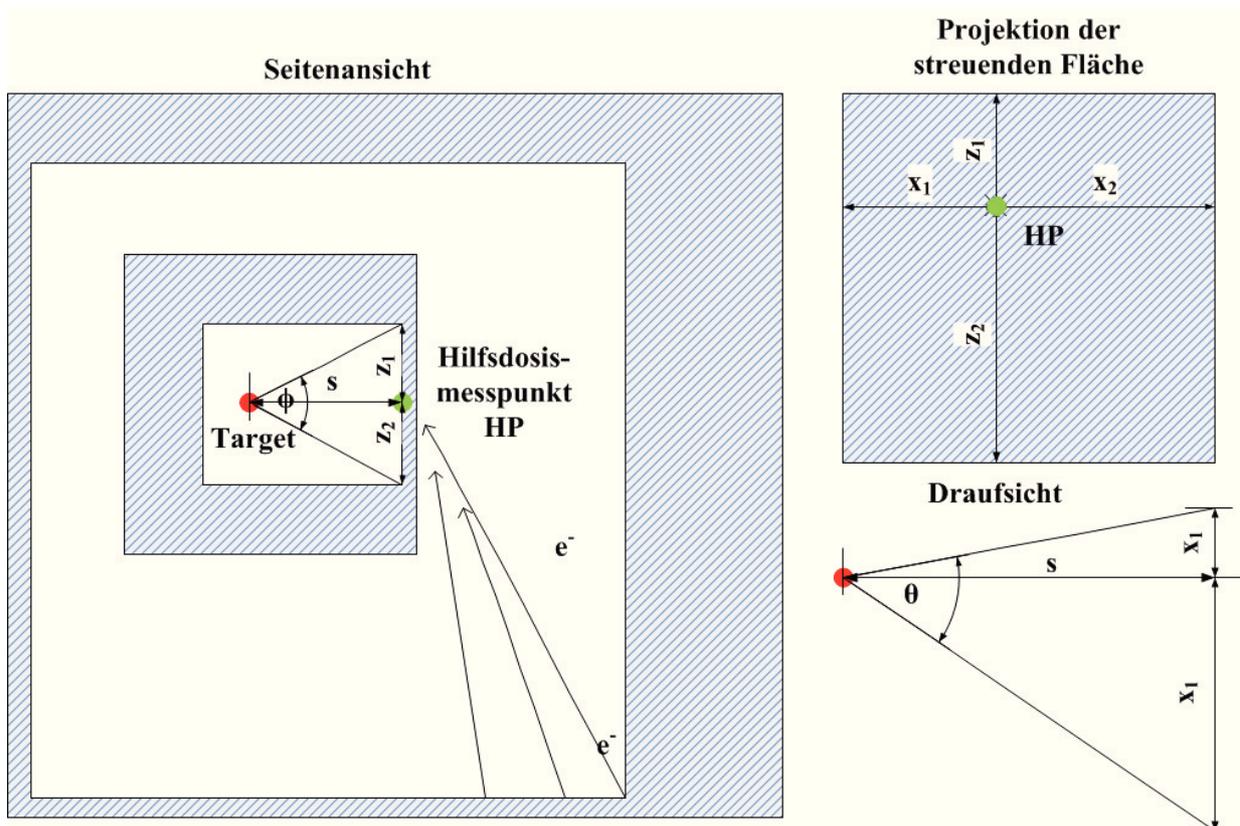


Abbildung 57: Die Anordnung zur Ermittlung der Hilfsdosis und die zugrunde liegenden Größen.

Die Dosis an der Position des Bauteils ergibt sich dann aus der Abnahme der Elektronenanzahl n mit dem Abstand s , die durch ihren Einfallswinkel das Target potenziell erreichen könnten. Bei Vernachlässigung der Fläche des Targets lässt sich dieser Anteil aus dem Winkelausschnitt $\theta(s) \times \phi(s)$, unter dem die streuende Fläche vom Target aus gesehen erscheint, mit folgender Formel näherungsweise errechnen:

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

$$D_{\text{Target}} = D_H \cdot n(s) = D_H \cdot \frac{\theta(s) \cdot \phi(s)}{\pi^2} =$$

$$= \frac{D_H}{\pi^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{x_1}{s}\right) + \arctan\left(\frac{x_2}{s}\right) \right] \cdot \left[\arctan\left(\frac{z_1}{s}\right) + \arctan\left(\frac{z_2}{s}\right) \right] \quad (27)$$

Dabei sind x und z die jeweiligen Abstände zum Rand der streuenden Fläche wie in Abbildung 57.

5.5.4.4 Korrigierte Ergebnisse mit der Hilfsdosismethode

Angewendet wurde das Verfahren auf insgesamt sieben Positionen. Die drei Positionen, deren Korrektur mit der dreidimensionalen Randwertanalyse in Abschnitt 5.5.4.2 fehlgeschlagen ist, zwei Positionen, bei denen die Abweichungen nicht über der Toleranz lagen, aber die eine ähnliche geometrische Anordnung besitzen sowie zwei Positionen, die ebenfalls nicht stark abwichen, aber die direkt exponiert sind und daher die zur Methode passende Situation nicht erfüllen. Dargestellt sind die Ergebnisse in Tabelle 34.

Tabelle 34: Ergebnisse der ursprünglichen Abweichung sowie der korrigierten Dosen von Bauteil 2. Oben die drei erheblich abweichenden Positionen, in der Mitte zwei Positionen die nicht stark abweichen, aber die geometrischen Bedingungen für die Anwendung der Hilfsdosismethode erfüllen und unten zwei nicht stark abweichende Positionen, die keine entsprechende geometrische Anordnung besitzen.

Target-Position	Ursprüngliche Messung		Korrigierte Werte mit Hilfsdosen	
	Abweichung	Unsicherheit	Abweichung	Unsicherheit
4_2_2_HU	-96.25%	0.54%	-50.00%	7.31%
5_3_HO	-73.22%	3.84%	-12.02%	12.47%
5_3_HM	-56.99%	5.47%	-4.43%	12.33%
4_2_2_HO	-45.03%	8.50%	2.90%	15.57%
5_3_HU	-16.90%	10.23%	-15.56%	10.45%
4_3_2_H	28.97%	18.17%	-49.43%	7.21%
5_1_H	43.45%	17.59%	102.24%	24.59%

Es zeigt sich, dass mit der Korrekturmethode die Abweichungen für alle Positionen, die eine entsprechende geometrische Anordnung haben, teilweise erheblich geringer ausfallen und die Werte alle im Toleranzbereich liegen. Es ist außerdem zu beachten, dass die Methode nur bei Vorliegen einer vergleichbaren räumlichen Situation funktioniert. Das zeigen die unteren zwei Ergebnisse, deren Abweichung durch die "Korrektur" erheblich zunimmt.

5.6 Fazit

Die bereits von Lindberg [89] publizierten erheblichen Abweichungen von Dosen aus Sektoranalysen von denen aus Monte-Carlo-Analysen konnten teilweise bestätigt werden. Allerdings scheint ein bedeutender Anteil der teils extremen Abweichungen durch die weitverbreiteten SHIELDDOSE-Tiefendosiskurven zu entstehen. Deren Werte für Elektronenstrahlung liegen konsequent über denen, die mit Geant4 bestimmt wurden. Grundsätzlich zeigt aber die Erhöhung der Komplexität eines Satellitenmodells durch Verwendung zusätzlicher Materia-

5. Die Zuverlässigkeit von Dosiswerten aus Sektoranalysen

lien und geometrischer Formen bzw. durch Erhöhung der Volumenanzahl keine direkte Auswirkung auf die Zuverlässigkeit der Sektoranalyse. Trotzdem konnten bei einem weiteren Vergleich mit einem lokal komplexeren d.h. detaillierteren Modell teilweise starke Abweichungen gefunden werden.

Der genauen Analyse der Abweichungen liegen verschiedene Ursachen zugrunde. Eine bedeutende Größe stellen die Ausmaße des Targetvolumens dar. Dieses wirkt sich je nach Mächtigkeit sowie der relativen Position zur unmittelbaren Umgebung und zum Satelliten auf die Abweichung der Ergebnisse der beiden Verfahren aus. Zudem kann eine Abschirmung zu einem starken Dosisgradienten im Target führen und auch die Vernachlässigung der Elektronenstreuung kann bei Vorliegen einer bestimmten geometrischen Situation zu starken Abweichungen führen.

Die Kenntnis dieser Ursachen erlaubt es, mittels Detailanalysen der entsprechenden Bauteile und Korrekturmethode die Dosen ausschließlich mit der Sektoranalyse innerhalb eines Toleranzbereichs korrekt zu ermitteln. Für die Anwendung der Korrekturmethode ist es dabei unerlässlich, die genaue Position, die unmittelbare Umgebung und Art und Größe des Targets zu kennen, um die jeweils angebrachte Detailanalyse und Korrektur vornehmen zu können.

Zusammenfassend kann die Sektoranalyse bei Kenntnis ihrer Schwachstellen als verlässliche Methode angesehen werden, sofern die verwendete Tiefendosiskurve korrekte Werte enthält. Das Programm SHIELDDOSE ist in diesem Zusammenhang kritisch zu bewerten und bedarf einer genaueren Analyse.

6 Erkenntnisse für den Prozess der Strahlungsanalyse in der Praxis

Da die Strahlungsanalyse mit Monte-Carlo-Methode ein vergleichsweise aufwendiger Prozess ist, kommt in der Praxis trotz bekannter Unsicherheiten die Verlässlichkeit betreffend weiterhin häufig die Sektoranalyse zum Einsatz. Wie Kapitel 5 gezeigt, hat funktioniert das Verfahren grundsätzlich gut, sofern einige Umstände beachtet werden. Im folgenden Kapitel sollen Schlüsse für die praktische Anwendung und die zu verwendenden Verfahren gezogen werden. Außerdem werden das Einsparpotenzial durch die vorgeschlagenen Maßnahmen allgemein und für den konkreten Fall der Jupitersonde JUICE abgeschätzt.

6.1 Tiefendosiskurven

6.1.1 SHIELDOSE

Wie in Abschnitt 5.3 erläutert und auch von Lindberg [89] festgestellt, weisen die Tiefendosisdaten von SHIELDOSE teils deutliche Unterschiede zu Werten auf, die mit Geant4-basierten Tools gewonnen wurden. Aus mehreren Gründen sind die Daten von SHIEDOSE als weniger verlässlich als jene von Geant4 zu einzustufen:

- Die Datenbasis ist teilweise relativ alt (SHIELDOSE von 1980, SHIELDOSE-2 von 1994), aus Gründen der Konsistenz wurden die Erweiterungen von SHIELDOSE-2Q (2010) ebenfalls mit ITS3 (aus ETRAN entwickelt) berechnet [62].
- Die Rechnungen erfolgten nicht für Kugel- sondern Plattengeometrie und wurden umgerechnet.
- Es erfolgte keine tatsächliche Berechnung für Siliziumtargets, sondern eine Umrechnung von Aluminiumtargets mit Konversionsfaktoren.

Andererseits hat sich die Anwendung von SHIELDOSE seit vielen Jahrzehnten in zahlreichen Missionen bewährt. Die einfache Bedienung (z.B. in SPENVIS) und schnelle Resultate sind außerdem ein wichtiger Vorteil in der Praxis. Zudem stimmen die Protonendosen mit Geant4-Modellen gut überein.

6.1.2 Geant4

Aufgrund der offensichtlichen Schwächen von SHIELDOSE kann zur Einsparung von Kosten, die z.B. durch strahlengehärtete Bauteile und Extramassen für Abschirmung bei Überschätzung der Belastung entstehen, eine Tiefendosiskurve mit Geant4-Programmen angefertigt werden. Geeignet sind dafür insbesondere GRAS [70] und MULASSIS [69], in denen sich ohne extra benötigte Geometriedateien Platten- und Kugelgeometrien über Kommandozeilen in Makrodateien definieren lassen.

6. Erkenntnisse für den Prozess der Strahlungsanalyse in der Praxis

Allerdings hat diese Vorgehensweise den Nachteil, dass sie im Vergleich zu SHIELDOSE ziemlich aufwendig ist. So muss der Dosiswert für jede Abschirmtiefe einzeln durch Simulation ermittelt werden. Dies erfordert einen gewissen Arbeitsaufwand und dauert je nach geometrischer Anordnung (Abschirmtiefe und Targetgröße bei Kugelform), Teilchenspektrum, physikalischer Akkuratessse und Fehlertoleranz bis zu mehreren Tagen pro Tiefendosiswert.

6.1.3 Fazit

Beide bestehenden Möglichkeiten zur Erstellung von Tiefendosiskurven besitzen Vor- und Nachteile, die in Tabelle 35 zusammengefasst sind.

Tabelle 35: Vergleich der Nutzbarkeit von SHIELDOSE und Geant4 zur Erstellung von Tiefendosiskurven.

Kategorie	SHIELDOSE (in SPENVIS)	Geant4 (GRAS, MULASSIS)
Vorwissen/ Installation	nicht erforderlich, einfach bedienbar	Installation relativ anspruchsvoll, Bedienung setzt intensive Beschäftigung mit den Tools voraus
Arbeitsaufwand	sehr gering	vergleichsweise hoch
Zeitaufwand	sehr gering	sehr hoch
Ergebnisse Protonen	verlässlich	verlässlich
Ergebnisse Elektronen	fragwürdig	verlässlich

Insgesamt müssen beide Optionen als unbefriedigend eingestuft werden, denn die fragwürdigen Ergebnisse für Elektronen (Überschätzung der Dosis) machen eine Nutzung von SHIELDOSE in Orbits mit starker Elektronenkomponente (MEO, GEO, Jupiter) unter Umständen teuer, und der vergleichsweise hohe Aufwand bei der Nutzung von Geant4 ist gleichermaßen störend.

Zukünftig sind zur Verbesserung der Situation folgende Vorschläge umsetzbar:

- Eine genaue Analyse der Abweichungen von SHIELDOSE und entsprechende Handlungsanweisungen über die jeweilige Nutzbarkeit.
- Die Aktualisierung von SHIELDOSE mit einer komplett neuen Datenbasis basierend auf Geant4 ohne Umrechnungen bzw. die Neuerstellung eines ähnlich funktionierenden Programms mit aktuellen Daten.
- Für Weltraumumgebungsspezifikationen ("*Environment Specifications*") zu größeren Missionen könnten die Tiefendosisdaten in Zukunft von der zuständigen Stelle (z.B. der ESA) direkt mit Geant4 erzeugt werden. Diese einmal erzeugten Daten können dann von allen an der Mission beteiligten Instrumententeams genutzt werden, was den erhöhten Aufwand rechtfertigt.

Grundsätzlich ist auch denkbar, dass zukünftig durch ausschließlichen Einsatz von direkt angewandter Monte-Carlo-Simulation keine Tiefendosiskurven mehr benötigt werden und SHIELDOSE dadurch ohnehin obsolet würde.

6.2 Methoden zur Dosisbestimmung

6.2.1 Sektoranalyse

Die Zuverlässigkeit der Sektoranalysenmethode wurde in Kapitel 5 ausführlich behandelt. Sie hängt maßgeblich von der verwendeten Tiefendosiskurve ab. Enthält diese Werte, die dieselbe Grundlage wie die zum Vergleich herangezogene Monte-Carlo-Methode haben, sind die Ergebnisse im Wesentlichen vergleichbar und damit als zuverlässig zu charakterisieren. Bei detaillierten Modellen auftretende starke Abweichungen sind durch spezielle Einflüsse erklär- und damit korrigierbar. Allerdings gibt es diese hohen Abweichungen zunächst einmal und das bedeutet, dass jedes untersuchte Objekt genau analysiert werden sollte. Insbesondere, wenn es sich um ein räumlich ausgedehntes Target handelt, sollten mehrere Positionen untersucht und ein potenzieller Dosisgradient ermittelt werden sowie Situationen, in denen gestreute Elektronen relevant sind berücksichtigt werden. Mehrere Messungen sind aber gewöhnlich kein großer Aufwand, denn die Stärken der Sektoranalyse liegen in der Kürze der Simulationsdauer sowie in der Einfachheit des Prinzips.

6.2.2 Monte-Carlo-Simulation

Die Methode der Dosisbestimmung mit der Monte-Carlo-Simulation diene in dieser Arbeit als Referenz. Die Ergebnisse kommen durch die Vielzahl an stochastischen Ereignissen durch jeweils physikalisch exakt beschriebene Vorgänge zustande und gewinnen mit zunehmender Anzahl an Qualität, d.h. der statistische Fehler nimmt ab. Diese Tatsache stellt aber gleichzeitig auch aus praktischer Sicht ein Problem dar, denn die Dosisberechnung kann je nach Größe des Satellitenmodells, Größe des Targets, Abschirmungsgrad und Teilchenspektrum einen erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwand erfordern. So wurden für die in dieser Arbeit errechneten Elektronendosen für die großen Satellitenmodelle mit 100 Volumina bzw. das mit maximaler Komplexität jeweils $7,2 \times 10^{10}$ Primärelektronen simuliert. Dazu mussten aufgrund einer programminternen Beschränkung auf etwa zwei Milliarden Teilchen pro Anordnung 36 einzelne Simulationen durchgeführt werden, die jeweils etwa 50 Stunden dauerten. Trotzdem sind die statistischen Fehler bei dem Satelliten mit maximaler Komplexität teilweise recht groß und erreichen für bestimmte Positionen etwa 15%, obwohl die verwendeten Testtargets sehr groß dimensioniert sind.

6.2.3 Fazit

Bei der Wahl der geeigneten Methode sollten die in Tabelle 36 gelisteten Vor- und Nachteile, die bei den zahlreichen Simulationen festgestellt wurden, bedacht werden. Beide Methoden haben Vor- und Nachteile. Ist eine hohe Genauigkeit entscheidend, sollte der Monte-Carlo-Simulation der Vorzug gegeben werden. Ansonsten ist aufgrund des offensichtlichen Aufwands im Allgemeinen bei großen, stark abgeschirmten Körpern mit kleinen Targets die Sektoranalyse unter der Voraussetzung des Vorliegens einer validen Tiefendosiskurve vorzuziehen.

6. Erkenntnisse für den Prozess der Strahlungsanalyse in der Praxis

Tabelle 36: Vor- und Nachteile beider Analysemethoden.

Kategorie	Sektoranalyse (SSAT)	Monte-Carlo-Methode (GRAS)
Vorwissen/ Installation	Selbstinstallation anspruchsvoll, eine bereits kompilierte, ausführbare Version für Windows existiert allerdings. Ausführung über Makros vergleichbar mit GRAS.	Installation relativ anspruchsvoll, Bedienung setzt intensive Beschäftigung mit dem Tool voraus, Ausführung über Makros.
Arbeitsaufwand	gering (vor allem Makros erstellen/ändern)	gering bis hoch, je nach Größe des Modells viele Simulationen nötig.
Zeitaufwand	gering, Rechendauer je nach Raumwinkelgröße, meistens < 1 min.	mittel bis sehr hoch, je nach Modellgröße und Teilchenspektrum
Ergebnisse Protonen	im Allgemeinen verlässlich (Abweichung < 50%)	verlässlich bei ausreichender simulierter Teilchenzahl
Ergebnisse Elektronen	kritische Betrachtung aufgrund von Unsicherheiten durch die räumliche Ausdehnung nötig, es können lokal enorme Abweichungen entstehen	verlässlich bei ausreichender simulierter Teilchenzahl

Zukünftige Entwicklungen, die die Situation verbessern könnten, wären:

- Schnellere Monte-Carlo-Simulationen durch erhöhte Rechnerleistung oder den Einsatz von Großrechnern.
- Vereinfachte Monte-Carlo-Simulationen, die nur für die Anwendung relevante Prozesse berücksichtigen oder die beide Analysemethoden vereinen.
- Inverse Monte-Carlo-Methoden, die vom Target aus zurückrechnen und so die Rechendauer massiv reduzieren.

Im Verlauf der Arbeit wurde bereits die Möglichkeit einer inversen Monte-Carlo-Simulation mit dem Physikpaket "adjoint_physics" in GRAS implementiert. Erste eigene Tests damit stellen aber die Zuverlässigkeit zumindest in diesem frühen Entwicklungsstadium in Frage, da keine Übereinstimmung zu herkömmlich simulierten Ergebnissen gefunden wurde.

6.3 Kosteneinsparpotenzial

Der folgende Abschnitt enthält eine Abschätzung von Kosteneinsparpotenzialen, die die vorgestellten Methoden bieten. Die Einsparungsmöglichkeiten liegen dabei in erster Linie in der Dosisreduktion. Diese erfolgt entweder durch optimierte Abschirmungen tatsächlich oder die berechnete Dosis wird bei zunehmender Verlässlichkeit niedriger. Im zweiten Teil wird die Einsparung für den konkreten Fall eines wissenschaftlichen Instruments auf JUICE abgeschätzt.

6.3.1 Einsparpotenziale durch die neuen Methoden

6.3.1.1 Massenoptimierte Abschirmungen

Das grundsätzliche Optimierungsvermögen hängt stark von Art und Energieverteilung der Primärstrahlung und damit von den durchflogenen Orbits sowie der Position im Satelliten ab. Dabei ist das Potenzial zur Einsparung von Masse bei Elektronen größer als bei Protonen. Dies zeigt sich bei den untersuchten Orbits, nämlich LEO, MEO und GEO (für 5 mm Al eq. nach [76]) sowie einem Spektrum für einen typischen Jupiterorbit (für 10 mm Al eq. nach

6. Erkenntnisse für den Prozess der Strahlungsanalyse in der Praxis

[77]), deren jeweiliges Dosisreduktionspotenzial im Vergleich zu Aluminium- bzw. Tantalabschichten in Tabelle 37 dargestellt ist.

Tabelle 37: Maximale Dosisreduktion durch die jeweils beste ermittelte Materialkombination im Vergleich zu reinen Aluminium- bzw. Tantalabschirmungen nach [76] bzw. [77].

Orbit (Höhe, Inklination)	Minimale Dosis zu Dosis (Al)	Minimale Dosis zu Dosis (Ta)
LEO (900 km, 55°)	86,5% (PE)	69,4% (PE)
MEO (20.200 km, 55°)	14,0% (PE-Ta)	43,0% (PE-Ta)
GEO (35.786 km, 0°)	56,5% (PE-W)	44,3% (PE-W)
Jupiterorbit (nicht angegeben)	51,4% (Ta)	100% (Ta)

Es zeigt sich, dass durch die Optimierung von Abschirmungsmaterialien teilweise erhebliche Dosisreduktionen möglich sind, wie das Beispiel des MEO eindrucksvoll belegt. Gerade wenn Protonen nennenswert zur Belastung beitragen, sind die häufig verwendeten, reinen Tantalabschirmungen nicht optimal. Zudem ist zu beachten, dass in den dieser Zusammenstellung zugrundeliegenden Studien Materialien und Kombinationen in festen Massenverhältnissen von 0,50 : 0,50 verwendet wurden. Eine weitere Massenoptimierung könnte die Dosis also möglicherweise noch etwas reduzieren.

6.3.1.2 Berücksichtigung der Wabenkerne von Wabensandwichpaneelen

Durch die Berücksichtigung der Wabenkerne aus Wabensandwichpaneelen (siehe Kapitel 4) wird die errechnete Dosis und damit ein eventueller Abschirmungsbedarf etwas reduziert. Nimmt man an, dass der Satellit rundum mit diesen Wabenstruktursandwichplatten bedeckt ist, reduzieren sich die Massenbelegungen der Abschirmungen um die den Waben gemäß Formel (17) zuzuweisende Massenbelegung d_{EP} . Für die in Kapitel 4 verwendeten Deckplatten- und Wabenkernabmessungen ergeben sich die in Tabelle 38 eingetragenen Abschirmäquivalente. Diese würden sich bei massiveren Wabenkernen und/oder kleineren Zellgrößen noch entsprechend erhöhen.

Tabelle 38: Die errechneten Abschirmäquivalentmassenbelegungen für drei unterschiedliche Dicke Sandwichpaneel.

Dicke der Sandwichpaneel [mm]	Massenbelegungen [g/cm ²]		
	Deckplatte	Wabenkernäquivalent	Abschirmäquivalent
10	0,0656	0,0238	0,0161
20	0,0656	0,0496	0,0405
30	0,0656	0,0753	0,0650

Insgesamt sind die Einsparungen als sehr gering einzustufen. So entspricht die Massenbelegung von 0,0405 g/cm² einer 0,15 mm dicken Aluminiumschicht. Damit ließen sich beispielsweise bei einer Gesamtoberfläche aller Abschirmungen in einem Satelliten von 1 m² rund 400 g Masse einsparen.

Relevanz kann die Berücksichtigung der Wabenkerne in zwei denkbaren Szenarien trotzdem erhalten. Zum einen reduziert sich die Dosis für Bauteile, die direkt hinter dem Paneel sitzen, durch den üblicherweise großen Gradienten der Tiefendosiskurve im Bereich geringer Abschirmung trotz der geringen Massenbelegung durch die Waben enorm. Dadurch kann im

6. Erkenntnisse für den Prozess der Strahlungsanalyse in der Praxis

Einzelfall unter Umständen auf ein gehärtetes Bauteil oder eine Zusatzabschirmung verzichtet werden. Zum anderen können bei Missionen mit außergewöhnlichen Belastungen wie im Strahlungsgürtel Jupiters, wo ein hoher Abschirmungsbedarf besteht, auch kleine zusätzliche Massenbelegungen zu nennenswerten Einsparungen führen.

6.3.1.3 Vermeidung von SHIELDOSE

Konkrete Aussagen, welche Einsparungen durch die Vermeidung von SHIELDOSE zu erzielen sind, können schwer getätigt werden, da die Abweichungen von mehreren Faktoren wie der Art der Strahlung, der Energieverteilung und der Abschirmtiefe abhängen. Allerdings gibt es einige Anhaltspunkte, die Schätzungen zulassen. So sind die Abweichungen für Protonendosen relativ gering, und im Mittel kann im Wesentlichen von einer Übereinstimmung ausgegangen werden. Daraus folgt, dass es bei Protonendosen kein Potenzial zur Einsparung gibt.

Anders stellt sich die Situation für Elektronen dar. So zeigen sowohl die Ergebnisse aus Abschnitt 5.3 als auch die von Lindberg et al. [89] teilweise erhebliche Abweichungen von mehreren 100%. In allen untersuchten Fällen lagen die von SHIELDOSE bestimmten Dosen über denen von GRAS/Geant4. Daraus folgt, dass sich die Elektronendosis bei Verwendung dieser verlässlicheren Programme in vielen Fällen auf deutlich unter 50% und im Durchschnitt auf geschätzt 50% des SHIELDOSE-Werts absinken würde. Diese Zahlen rechtfertigen daher die Erstellung eigener Tiefendosiskurven voll und ganz.

6.3.1.4 Weiterverwendung der Sektoranalyse mit Korrekturmethode

Durch die Korrekturmethode wird die Zuverlässigkeit des Sektoranalyseverfahrens erhöht und damit eine Weiterverwendung, die aufgrund der starken Abweichungen in Frage zu stellen war, ermöglicht. Wie bereits gezeigt wurde, können bei großen Satellitenmodellen oder stark abgeschirmten kleinen Targets bei der Monte-Carlo-Simulation erhebliche Rechenzeiten mit erhöhtem Arbeitsaufwand entstehen. Durch die Verbesserung des Sektoranalyseprozesses ergeben sich zwar keine direkten Einsparungen am Satelliten, aber der industrielle Prozess der Strahlungsanalyse bleibt bei verbesserter Verlässlichkeit zeitlich effizient und spart dadurch insbesondere Arbeitskosten.

6.3.2 Einsparung im konkreten Fall des vorgeschlagenen JARS-Instruments

Beim *Jupiter Atmosphere Radio Science Experiment* (JARS) handelte es sich um einen Experimentvorschlag zur Radiosondierung von Jupiters Atmosphäre und den Galileischen Monden. Das zugehörige Instrument, ein Ultrastabiler Oszillator (USO) der TimeTech GmbH aus Stuttgart, der eine extrem hohe Frequenzstabilität $\Delta f/f$ von 3×10^{-13} s über 10 s integrierte Zeit besitzt, sollte auf der JUICE-Mission mitfliegen, letztlich wurde aber ein anderer Vorschlag ausgewählt.

6.3.2.1 Rahmendaten von JARS

Das JARS-Instrument, der USO, ist im vorliegenden Fall für die JUICE-Mission ausgelegt worden. Diese soll insgesamt elf Jahre dauern, wobei der Transfer zum Jupiter bereits knapp acht Jahre dauert. Die wesentliche Strahlendosis kommt aber in den etwa drei Jahren im Strahlungsgürtel des Jupiters durch hochenergetische Elektronen zustande und hat ein enormes Ausmaß. Daher ist es notwendig, strahlengehärtete Bauteile und Bauteilabschirmungen

6. Erkenntnisse für den Prozess der Strahlungsanalyse in der Praxis

zu verwenden. Ein Modell des untersuchten USOs mit den strahlungssensiblen Komponenten ist in Abbildung 58 zu sehen.

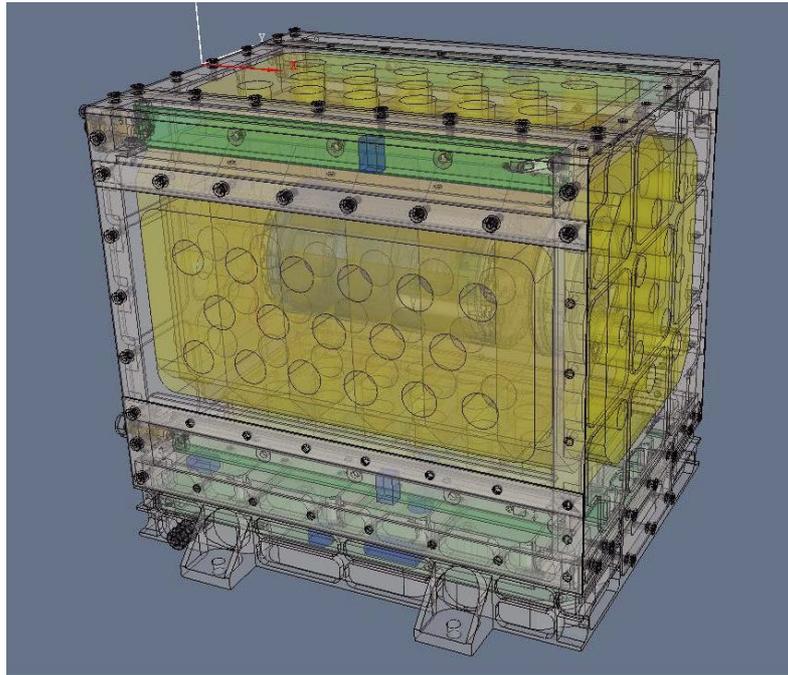


Abbildung 58: Ein Modell des untersuchten USOs basierend auf einer STEP-Datei der TimeTech GmbH aus Stuttgart. Die strahlungssensiblen Bauteile (in blau) befinden sich auf den Platinen im unteren Bereich und an den oberen Seiten sowie im Inneren.

Insgesamt wurden 24 empfindliche Elemente identifiziert und die Dosisbelastung für die jeweiligen Positionen mit einer Sektoranalyse mit dem Programm Dosrad in Verbindung mit der von der ESA bereitgestellten Tiefendosiskurve errechnet [90]. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 39 eingetragen. Die drei im Inneren verbauten Transistoren sowie der Quarzkristall, die nach den vorliegenden Dosisbelastungen als unkritisch eingestuft wurden, sind hier nicht enthalten. Bei der Analyse wurde der USO als freifliegendes Instrument behandelt, wobei als Abschirmung durch das Raumfahrzeug (S/C) laut Vorgaben 1 mm Al eq. angenommen werden durfte. Die hohen Dosen und ein zusätzlich berücksichtigter Sicherheitsfaktor 2 führen zu einem enormen Abschirmungsbedarf, der eine erhebliche Gewichtszunahme des Instruments bedeutet.

6. Erkenntnisse für den Prozess der Strahlungsanalyse in der Praxis

Tabelle 39: Die Ergebnisse aus der Strahlungsanalyse des JUICE-USO. Es besteht durch die hohen Energiedosen ein erheblicher Abschirmbedarf.

Bereich	Teil/Bezeichnung	Dosis inkl. S/C	Dosistoleranz [krad]	4 π -Abschirmungsbedarf inkl. SF=2 [mm Al. eq.]
1814 PCB-Synthesizer	LMH6702_DIP8	631.0	100	16.32
	LMH6702_DIP8 (2)	588.0	100	16.08
	LMH6702_DIP8 (3)	449.0	100	15.29
	LMH6702_DIP8 (4)	383.0	100	14.39
	LMH6702_DIP8 (5)	634.0	100	16.34
	RH1013_TO99	441.0	50	22.60
	RH1013_TO99 (2)	329.0	50	21.00
	RH1013_TO99 (3)	319.0	50	20.86
	RH1013_TO99 (4)	427.0	50	22.40
1811 PCB-Power	AMP01_DIP18 - Ersatz	791.0	50	24.62
	OP27_TO99	852.0	50	24.80
	RH1013_TO99	826.0	100	17.34
	RH1013_TO99 (2)	848.0	100	17.40
	RH1013_TO99 (3)	886.0	100	17.50
	RH1014_DIP14	875.0	100	17.47
	RH1014_DIP14 (2)	841.0	100	17.38
1816 Output-Buffer	LMH6702_DIP8	2590.0	100	19.73
	LMH6702_DIP8 (2)	2590.0	100	19.73
	LMH6702_DIP8 (3)	1670.0	100	18.92

6.3.2.2 Abgeschätztes Masseneinsparpotenzial

Das Einsparungspotenzial besteht hier aus drei verschiedenen Maßnahmen, deren Wirkung im Folgenden abgeschätzt wird.

Massenoptimierte Abschirmung

Aus Tabelle 39 geht der jeweilige Abschirmungsbedarf über den kompletten Raumwinkel von 4π hervor. In der Realität wird die Abschirmung üblicherweise direkt auf das Bauteil vorzugsweise in der Hauptexpositionsrichtung aufgebracht. Für die hier getätigte Abschätzung wird einfach davon ausgegangen, dass die Bauteile alle quaderförmig (einige sind tatsächlich zylindrisch) sind und eine Abschirmung auf allen Seiten der Gesamtoberfläche des Körpers bekommen.

Der Abschirmungsbedarf für Aluminium ergibt sich aus der Umrechnung der Dicke in mm Aluminiumäquivalent (mm Al eq.) aus Tabelle 39 in die entsprechende Massenbelegung. In einer zur JUICE-Mission getätigten Studie [91] wird gezeigt, dass sich die Dosis bei einer Abschirmungsdicke von 10 mm Al eq. für reines Tantal auf etwa 60% und für die optimale Kombination von Blei auf einer 0,3 mm starken Aluminiumschicht auf etwa 43% des Wertes für reines Aluminium reduziert. Eine Graphik mit den Ergebnissen aus dieser Arbeit befindet sich in Abbildung 59.

6. Erkenntnisse für den Prozess der Strahlungsanalyse in der Praxis

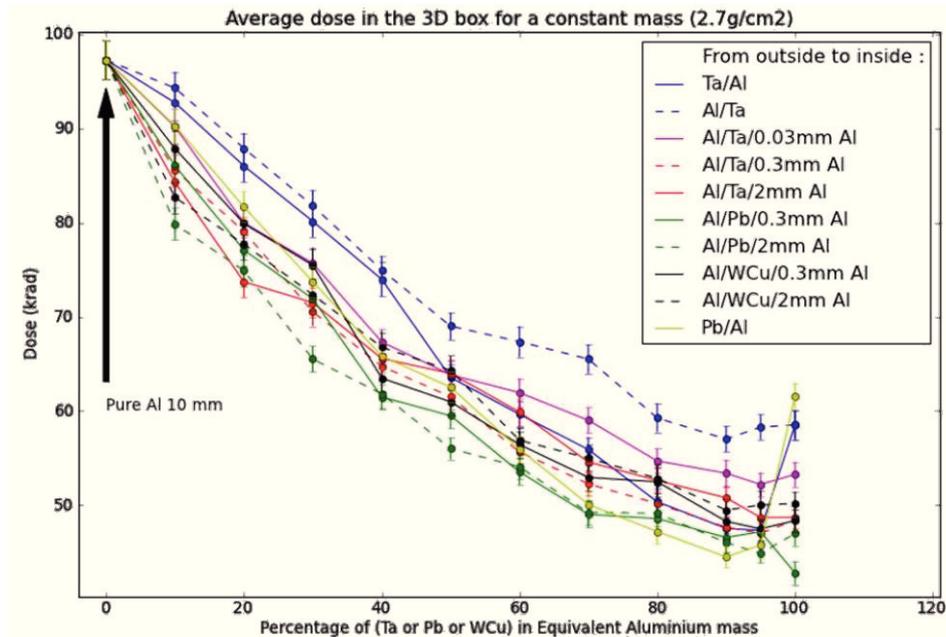


Abbildung 59: Ergebnisse einer Studie zur massenoptimierten Abschirmung bei der JUICE-Mission [91].

Tabelle 40: Der abgeschätzte Abschirmungsbedarf und die daraus resultierenden Massen für Aluminium, Tantal und die massenoptimierte Kombination Pb/0,3mm Al.

Teil/Bezeichnung	Oberfläche [mm ²]	4π-Abschirmungsbedarf inkl. SF=2 [g/cm ²]			Massenbedarf [g]		
		Al	Ta	Pb/0,3mm Al	Al	Ta	Pb/0,3mm Al
LMH6702_DIP8	280	4.41	2.63	1.91	12.3	7.4	5.3
LMH6702_DIP8 (2)	280	4.34	2.60	1.88	12.2	7.3	5.3
LMH6702_DIP8 (3)	280	4.13	2.47	1.79	11.6	6.9	5.0
LMH6702_DIP8 (4)	280	3.89	2.32	1.68	10.9	6.5	4.7
LMH6702_DIP8 (5)	280	4.41	2.64	1.91	12.4	7.4	5.3
RH1013_TO99	400	6.10	3.65	2.64	24.4	14.6	10.6
RH1013_TO99 (2)	400	5.67	3.39	2.46	22.7	13.6	9.8
RH1013_TO99 (3)	400	5.63	3.37	2.44	22.5	13.5	9.8
RH1013_TO99 (4)	400	6.05	3.62	2.62	24.2	14.5	10.5
AMP01_DIP18-Ersatz	588	6.65	3.97	2.88	39.1	23.4	16.9
OP27_TO99	400	6.70	4.00	2.90	26.8	16.0	11.6
RH1013_TO99	400	4.68	2.80	2.03	18.7	11.2	8.1
RH1013_TO99 (2)	400	4.70	2.81	2.03	18.8	11.2	8.1
RH1013_TO99 (3)	400	4.73	2.83	2.05	18.9	11.3	8.2
RH1014_DIP14	500	4.72	2.82	2.04	23.6	14.1	10.2
RH1014_DIP14 (2)	500	4.69	2.81	2.03	23.5	14.0	10.2
LMH6702_DIP8	280	5.33	3.19	2.31	14.9	8.9	6.5
LMH6702_DIP8 (2)	280	5.33	3.19	2.31	14.9	8.9	6.5
LMH6702_DIP8 (3)	280	5.11	3.05	2.21	14.3	8.6	6.2
Jeweiliger Gesamtabschirmungsbedarf:					366.6	219.2	158.7

6. Erkenntnisse für den Prozess der Strahlungsanalyse in der Praxis

Basierend auf diesen Werten wurde die unterschiedliche Wirksamkeit von Abschirmungen aus anderen Materialien bzw. deren Kombination berücksichtigt und die gesamte Abschirmungsmasse berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 40 aufgelistet. Durch die Verwendung der massenoptimalen Abschirmung kann also demzufolge deutlich Masse eingespart werden. Geht man von Tantalabschirmungen als Standard aus, können für das Instrument immerhin etwa 60 g Masse eingespart werden, was etwa 4% der USO-Masse von 1.500 g entspricht.

Berücksichtigung der Wabenkerne von Wabensandwichpaneelen

Nimmt man an, dass der JUICE-Satellit nach allen sechs Seiten Wabensandwichpaneele besitzt, kann man deren Abschirmung über den kompletten Raumwinkel annehmen. Geht man weiter von Paneelen in den hier behandelten Maßen mit 20 mm Dicke aus, ergibt sich mit dem Wert aus Tabelle 38 für die gesamte Oberfläche aller Abschirmungen eine Ersparnis von

$$0,0405 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \cdot 70,28 \text{cm}^2 = 2,85 \text{g}$$

Vermeidung von SHIELDOSE

Konkrete Zahlen zur möglichen Einsparung bei Vermeidung von SHIELDOSE sind nicht möglich. Trotzdem kann, wie bereits in Abschnitt 6.3.1.3 erläutert wurde, angenommen werden, dass sich bei Verwendung einer Geant4-Tiefendosiskurve im Vergleich zu SHIELDOSE die Dosis auf durchschnittlich 50% reduziert. Eine dementsprechende Abschätzung ergibt einen etwas geringeren Abschirmungsbedarf und daraus für Abschirmungen der massenoptimalen Kombination aus Blei auf 0,3 mm Aluminium eine Abschirmungsmasse von 139,4 g. Somit beträgt die Ersparnis dieser Maßnahme 19,3 g.

Gesamteinsparung

Die Gesamteinsparung ergibt sich aus der folgenden Aufstellung:

Ersparnis durch massenoptimale Abschirmung gegenüber Tantalabschirmung	60,5 g
Ersparnis durch Berücksichtigung der Wabenkerne	2,9 g
Ersparnis durch Vermeidung von SHIELDOSE	19,3 g
<hr/> Gesamtersparnis	<hr/> 82,7 g

Somit können gegenüber der herkömmlichen Methode nach dieser Abschätzung 82,7 g Abschirmungsmasse für das Radiosondierinstrument USO eingespart werden. Dies entspricht einer Reduktion der ursprünglich angesetzten Tantalabschirmungsmasse um über 37% und stellt auf das Gesamtgewicht des USOs von etwa 1.500 g bezogen immerhin eine Gewichtersparnis von 5,5 % dar.

6.3.2.3 Finanzielle Ersparnis

Um die Massenersparnis in eine finanzielle Ersparnis umzurechnen, können unterschiedliche Ansätze verwendet werden. Das wesentliche Element eines Raumfahrzeugs ist aber normalerweise die Nutzlast. Vorgesehen ist für die JUICE-Mission eine Ariane-V-ECA-Trägerrakete [92], die etwa 114 Mio. Euro kostet [93]. Betrachtet man das komplette JUICE-Raumfahrzeug als Nutzlast, deren Gewicht beim Einschuss auf die Fluchtbahn vom Erdorbit

6. Erkenntnisse für den Prozess der Strahlungsanalyse in der Praxis

aus 4.800 kg beträgt [92], so ergeben sich Kosten von 23.750 Euro/kg. Da es hier aber eigentlich nur um die wissenschaftliche Nutzlast mit einer Masse von lediglich 104 kg geht [92], ist dieser Wert der sinnvollere: es ergeben sich dadurch Kosten von rund 1,1 Mio. Euro/kg. Daraus ergibt sich für den USO eine konkrete Ersparnis von etwa 91.000 Euro. Nimmt man an, dass bei allen Instrumenten der JUICE-Nutzlast Masseneinsparungen in dieser Größenordnung, nämlich 5,5%, möglich wären, könnten insgesamt 5,7 kg eingespart werden. Dies entspricht 6,3 Mio. Euro. Tatsächlich würde in diesem Fall aber natürlich nicht diese Geldsumme gespart, sondern durch weitere oder komplexere Instrumente ein wissenschaftlicher Mehrwert generiert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Arbeit war es, den Analyseprozess von Strahlenbelastungen bei Raumfahrtanwendungen effizienter und verlässlicher zu machen. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die praktische Anwendbarkeit gelegt. Weitere Schwerpunkte waren die Einsparung von unnötigem Abschirmungsgewicht durch Berücksichtigung der bislang nicht beachteten Wabenkerne in den gängigen Sandwichpaneelen der Satellitenstruktur und die Verwendung von massenoptimierten Materialschichten zur Abschirmung.

Methodisch kamen dabei überwiegend mit dem Monte-Carlo-Verfahren arbeitende Simulationsprogramme, die auf der vom CERN entwickelten Programmplattform Geant4 basieren, zum Einsatz. Diese stellen eine wissenschaftlich ebenso anerkannte wie weit verbreitete Methode zur Simulation des Transports von Teilchen durch Materie mit hoher Zuverlässigkeit dar. Weitere Grundlagen dieser Analysen waren zudem Modelle für Flussdichten kosmischer Strahlung sowie magnetisch eingefangener Teilchen der Strahlungsgürtel.

Da bei Missionen mit hoher Strahlenbelastung bzw. der bemannten Raumfahrt erhöhter Abschirmungsbedarf besteht, wurden entsprechende Abschirmsysteme begutachtet. Bei passiven Abschirmungen, die in der Regel direkt auf die empfindlichen Bauteile angebracht werden, können so durch massenoptimierte Materialkombinationen je nach Primärspektrum relevante Abschirmungsmassen eingespart werden. Dies wurde am Beispiel eines ultrastabilen Oszillators für die Jupitermission JUICE gezeigt. Auch die Berücksichtigung der Wabenkerne in den Sandwichpaneelen der Satellitenstrukturen trägt hierbei zu einer kleinen Ersparnis bei. Die abschirmende Wirkung dieser Strukturen wurde dafür in der Arbeit im Detail für drei verschiedene Spektren untersucht. Die resultierende Abschwächung der Strahlung konnte daraus ermittelt und in die einer Platte äquivalenten Materials umgerechnet werden. Mit der entsprechenden Formel ist die Einbeziehung der komplexen Strukturen in das Modell für die Strahlungsanalyse, die *en detail* für ein komplettes Satellitenmodell kaum realisierbar ist, als Platte einfach umzusetzen.

Schwerpunkt der Arbeit waren der Vergleich und die Bewertung der zwei gängigen Methoden zur Analyse von Energiedosisbelastungen von Satelliten sowie neue Analyseansätze zur Verbesserung der Ergebnisse bei der Sektoranalyse. Ausgangspunkt der ausführlichen Untersuchung waren Hinweise auf stark schwankende, hohe Abweichungen der Ergebnisse von Sektoranalysen im Vergleich zu denen von Monte-Carlo-Verfahren für Elektronenstrahlung. Dabei war bereits ein systematisches Überschätzen der Dosis um bis zu Faktor 9 beobachtet worden. Gleichzeitig haben aber Monte-Carlo-Analysen einige Nachteile, wie teilweise lange Rechenzeiten und hohe Komplexität, die deren Gebrauch beeinträchtigen, weshalb die vergleichsweise simple Sektoranalyse trotz dieser bekannten Schwächen weiter verwendet wird. In der ausführlichen Analyse dieser Methode mit den Monte-Carlo-Werten als Vergleichsmaßstab konnten die hohen Abweichungen bestätigt und einige Ursachen analysiert werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

So produziert bereits das Programm SHIELDDOSE, das zur Erzeugung der Tiefendosisdaten üblicherweise verwendet wird, abhängig von der Elektronenenergie und der Abschirmtiefe erhebliche Abweichungen um einige 100%. Als Abhilfe wurde zur weiteren Analyse eine mit GRAS/Geant4 berechnete Tiefendosis Kurve verwendet, was auch erheblich zur Verbesserung der Ergebnisse beitrug. Für grobe Satellitenmodelle bis 100 Volumina ergab sich mit den Geant4-Tiefendosisdaten eine zufriedenstellende Übereinstimmung, aber für ein Modell, das im Detail komplexer gestaltet war, waren wieder große Abweichungen mit Unterschieden von Faktoren größer als 2 sowohl nach oben als auch nach unten feststellbar. Hierfür wurden mehrere Ursachen identifiziert, die in den Abmessungen der Targets und der Position im Satelliten ihren Ursprung haben. So können sich einerseits große lokale Unterschiede innerhalb eines Targets ergeben, andererseits entstehen Fehler durch die Vernachlässigung von gestreuten Elektronen bei gewissen Anordnungen. Um diese Abweichungen zu korrigieren, wurden vier Verfahren zur detaillierten Analyse der Dosis im Target entwickelt, die die Abweichungen reduzieren und damit die Verlässlichkeit der Sektoranalyse deutlich erhöhen können.

Ausgehend von dieser Arbeit bieten sich einige Anknüpfungspunkte, an denen weitergehende Nachforschungen sinnvoll sind. So können Programme zur Optimierung von Abschirmungen weiterentwickelt und verbessert werden, beispielsweise durch die Einbeziehung der Lage der Abschirmung im Satelliten. Unbedingt erforderlich ist auch eine tiefergehende Studie zur SHIELDDOSE: liegen die Probleme nur an den tabellierten, vorberechneten Werten oder sind die großen Abweichungen am grundsätzlichen Konzept festzumachen? Diesbezüglich könnten beim Verständnis der Problematik Lösungen wie eine verbesserte Datenbasis oder eine neue Funktionsweise die Situation verbessern. Grundsätzlich ist allerdings die Monte-Carlo-Simulation die physikalisch exaktere und zuverlässigere Methode, sofern eine ausreichend gute Statistik erreicht wird. Um diese auch im Falle größerer Satelliten mit kleinen Targets in akzeptablen Zeiträumen zu erreichen, könnte deren Umsetzung auf Großrechnern eine praktikable Methode darstellen. Dasselbe Ziel könnte möglicherweise auch durch zuverlässig funktionierende, inverse Monte-Carlo-Simulationen erreicht werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] V. F. Hess, „Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten,“ *Physikalische Zeitschrift XIII*, pp. 1084-1091, 1912.
- [2] J. A. Van Allen, G. H. Ludwig, E. C. Ray und C. E. McIlwain, „Observation of High Intensity Radiation by Satellites 1958 Alpha and Gamma,“ *Journal of Jet Propulsion*, Bd. 28, Nr. 5, pp. 588-592, 1958.
- [3] L. Biermann, „Kometenschweife und solare Korpuskularstrahlung,“ *Zeitschrift für Astrophysik*, Bd. 29, pp. 274 - 286, 1951.
- [4] J. Banisch, Die Sonne, 1. Auflage Hrsg., Erlangen: Oculum, 2009.
- [5] D. A. Bryant, T. L. Cline, U. D. Desai und F. B. McDonald, „Explorer 12 observations of solar cosmic rays and energetic storm particles after the solar flare of September 28, 1961,“ *Journal of Geophysical Research*, Bd. 67, Nr. 13, pp. 4983 - 5000, Dezember 1962.
- [6] A. C. Tribble, The Space Environment, Princeton: Princeton University Press, 2003.
- [7] D. M. Harland und R. D. Lorenz, Space System Failures - Disasters and Rescues of Satellites, Rockets and Space Probes, Berlin: Springer, 2005.
- [8] W. Schäfer und W. Schumann, „PRARE-2 - Building on the Lessons Learnt from ERS-1,“ *ESA Bulletin*, Bd. 83, August 1995.
- [9] I. Ferain, C. A. Colinge und J.-P. Colinge, „Multigate transistors as the future of classical metal–oxide–semiconductor field-effect transistors,“ *Nature*, Bd. 479, Nr. 7373, pp. 310 - 316, 17. November 2011.
- [10] C. Zeitlin et al., „Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory,“ *Science*, Bd. 340, Nr. 6136, pp. 1080 - 1084, 31. Mai 2013.
- [11] G. W. Prölss, Physik des erdnahen Weltraums, 2. Auflage Hrsg., Berlin: Springer, 2004.
- [12] A. Holmes-Siedle und L. Adams, Handbook of Radiation Effects, Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [13] D. Hathaway, „National Aeronautics and Space Administration - Solar Cycle Prediction,“ 10. September 2014. [Online]. Available: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>. [Zugriff am 22. September 2014].

8. Literaturverzeichnis

- [14] D. Perkins, Particle Astrophysics, Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [15] D. Hastings und H. Garrett, Spacecraft Environment Interactions, Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [16] J. A. Simpson, „Elemental and Isotopic Composition of the Galactic Cosmic Rays,“ *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, Nr. 33, pp. 323 - 381, 1983.
- [17] J. Cronin, T. K. Gaisser und S. P. Swordy, „Cosmic Rays at the Energy Frontier,“ *Scientific American*, Januar 1997.
- [18] C. Grupen, Astroparticle Physics, Berlin: Springer, 2005.
- [19] D. Heynderickx, B. Quaghebeur, E. Speelman und E. Daly, „ESA's Space Environment Information System (SPENVIS): A WWW Interface to Models of the Space Environment and its Effects,“ *38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 10. - 13. Januar 2000.
- [20] „Space Environment Information System (SPENVIS),“ Belgian Institute for Space Aeronomy, [Online]. Available: www.spennis.oma.be.
- [21] H. Krieger, Strahlungsmessung und Dosimetrie, 2. Hrsg., Wiesbaden: Springer Spektrum, 2013.
- [22] A. J. Tylka, J. H. Adams, P. R. Boberg, B. Brownstein, W. F. Dietrich, E. O. Flueckinger, E. L. Petersen, M. A. Shea, D. F. Smart und E. C. Smith, „CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Bd. 44, Nr. 6, pp. 2150 - 2160, Dezember 1997.
- [23] M. A. Xapsos, G. P. Summers, J. L. Barth, E. G. Stassinopoulos und E. A. Burke, „Probability Model for Worst Case Solar Proton Event Fluences,“ *IEEE Transactions On Nuclear Science*, Bd. 46, Nr. 6, pp. 1481 - 1485, Dezember 1999.
- [24] M. A. Xapsos, G. P. Summers, J. L. Barth, E. G. Stassinopoulos und E. A. Burke, „Probability Model for Cumulative Solar Proton Event Fluences“,“ *IEEE Transactions On Nuclear Science*, Vol. 47, No. 3, pp. 486-490, Juni 2000.
- [25] M. A. Xapsos, C. Stauffer, T. Jordan, J. L. Barth und R. A. Mewaldt, „Model for Cumulative Solar Heavy Ion Energy and Linear Energy Transfer Spectra,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Bd. 54, Nr. 6, pp. 1985 - 1989, Dezember 2007.
- [26] J. H. King, „Solar Proton Fluences for 1977 - 1983 Space Missions,“ *Journal of Spacecraft and Rockets*, Bd. 11, Nr. 6, pp. 401 - 408, Juni 1974.
- [27] J. Feynman, G. Spitale, J. Wang und S. Gabriel, „Interplanetary Proton Fluence Model: JPL 1991,“ *Journal of Geophysical Research*, Bd. 98, Nr. 4, pp. 13281 - 13294, 1993.

8. Literaturverzeichnis

- [28] L. Rosenqvist, A. Hilgers, H. Evans und E. Daly, „Toolkit for Updating Interplanetary Proton-Cumulated Fluence Models,“ *Journal of Spacecraft and Rockets*, Bd. 42, Nr. 6, pp. 1077 - 1090, November - Dezember 2005.
- [29] ECSS Secretariat, “Space engineering - Space environment,” ECSS-E-ST-10-04C, 2008.
- [30] R. A. Nymmik, M. I. Panasyuk, T. I. Pervaja und A. A. Suslov, „A Model of Galactic Cosmic Ray Fluxes,“ *Nuclear Tracks and Radiation Measurement*, Bd. 20, Nr. 3, pp. 427 - 429, 1992.
- [31] International Standard, „Space environment (natural and artificial) - Galactic cosmic ray model,“ ISO 15390, 2004.
- [32] D. Sawyer and J. I. Vette, “AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum,“ NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, 1976.
- [33] J. D. Meffert und M. S. Gussenhoven, „CRRESPRO Documentation,“ PL-TR-94-2218 - Environmental Research Papers, No. 1158, 1994.
- [34] D. Heynderickx, M. Kruglanski, V. Pierrard, J. Lemaire, M. D. Looper und J. B. Blake, „A Low Altitude Trapped Proton Model for Solar Minimum Conditions Based on SAMPEX/PET Data,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Bd. 46, Nr. 6, pp. 1475 - 1480, Dezember 1999.
- [35] G. P. Ginet, T. P. O'Brien, S. L. Huston, W. R. Johnston, T. B. Guild, R. Friedel, C. D. Lindstrom, C. J. Roth, P. Whelan, R. A. Quinn, D. Madden, S. Morley und Y.-J. Su, „AE9, AP9 and SPM: New Models for Specifying the Trapped Energetic Particle and Space Plasma Environment,“ *Space Science Reviews*, März 2013.
- [36] J. I. Vette, „The AE-8 Trapped Electron Model Environment,“ NSSDC/WDC-A-R&S 91-24, 1991.
- [37] D. H. Brautigam und J. T. Bell, „CRRESELE Documentation,“ *Environmental Research Papers*, Nr. 1179, 31 Juli 1995.
- [38] A. L. Vampola, „Outer Zone Energetic Electron Environment Update,“ in s *High Energy Radiation Background in Space*, Snowmass, CO, USA, 1997.
- [39] A. Sicard-Piet, S. Bourdarie, D. Boscher, R. H. Friedel, M. Thomsen, T. Goka, H. Matsumoto und H. Koshiishi, „A new international geostationary electron model: IGE-2006, from 1 keV to 5.2 MeV,“ *Space Weather*, Bd. 6, Nr. 7, Juli 2008.
- [40] D. M. Boscher, S. A. Bourdarie, R. H. Friedel und R. D. Belian, „Model for the Geostationary Electron Environment: POLE,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*,

8. Literaturverzeichnis

Bd. 50, Nr. 6, pp. 2278 - 2283, Dezember 2003.

- [41] P. Gocalves, A. Keating, S. Valente, P. Truscott, F. Lei, L. Desorgher, D. Heynderickx, N. Crosby, H. de Witt, G. Degreef, P. Nieminen und G. Santin, „MarsREM: The Mars Energetic Radiation Environment Models,“ in s *Proceedings of the 31st ICRC*, Lodz, 2009.
- [42] N. Divine und H. B. Garrett, „Charged Particle Distributions in Jupiter's Magnetosphere,“ *Journal of Geophysical Research*, Bd. 88, Nr. A9, pp. 6889 - 6903, September 1983.
- [43] A. Sicard-Piet und S. Bourdarie, „Physical Electron Belt Model from Jupiter's surface to the orbit of Europa,“ *Journal of Geophysical Research*, Bd. 109, Nr. A2, Februar 2004.
- [44] A. Sicard-Piet, S. Bourdarie und N. Krupp, „JOSE: A new Jovian Specification Environment model,“ in s *European Planetary Science Congress*, 2010.
- [45] H. B. Garrett, I. Jun, J. M. Ratliff, R. W. Evans, G. A. Clough und R. W. McEntire, „Galileo Interim Radiation Electron Model,“ JPL Publication 03-006, Pasadena, CA, USA, 2003.
- [46] H. B. Garrett, J. M. Ratliff und R. W. Evans, „Saturn Radiation (SATRAD) Model,“ JPL Publication 05-9, Pasadena, CA, USA, 2005.
- [47] O. C. Allkofer, *Introduction to Cosmic Radiation*, München: Karl Thiemig, 1975.
- [48] C. Amsler, *Kern- und Teilchenphysik*, Zürich: vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, 2007.
- [49] D. Bräunig, *Wirkung hochenergetischer Strahlung auf Halbleiterbauelemente*, Berlin: Springer, 1989.
- [50] F. H. Attix, *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, Kanada: John Wiley & Sons, 1986.
- [51] M. J. Berger, J. S. Coursey, M. A. Zucker und J. Chang, „Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons and Helium Ions,“ National Institute of Standards and Technology (NIST), [Online]. Available: <http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm>.
- [52] H. Reich (Hrsg.), *Dosimetrie ionisierender Strahlung*, B.G. Teubner: Stuttgart, 1990.
- [53] W. Stolz, *Radioaktivität - Teil II*, Leipzig: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1978.
- [54] J. H. Hubbell und S. M. Seltzer, „Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest,“

8. Literaturverzeichnis

National Institute of Standards and Technology (NIST), [Online]. Available: <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>.

- [55] J. N. Anno, Notes on Radiation Effects on Materials, Berlin: Springer, 1984.
- [56] ECSS Secretariat, „Space engineering - Methods for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins,“ ECSS-E-ST-10-12C, 2008.
- [57] S. R. Messenger, E. A. Burke, G. P. Summers, M. A. Xapsos, R. J. Walters, E. M. Jackson und B. D. Weaver, „Nonionizing Energy Loss (NIEL) for Heavy Ions,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Bd. 46, Nr. 6, pp. 1595 - 1602, Dezember 1999.
- [58] E. Petersen, Single Event Effects in Aerospace, New Jersey: Wiley, 2011.
- [59] G. C. Messenger und M. S. Ash, Single Event Phenomena, New York: Chapman & Hall, 1997.
- [60] S. Seltzer, „SHIELDOSE: A Computer Code for Space-Shielding Radiation Dose Calculations,“ NBS Technical Note 1116, National Bureau of Standards, Mai 1980.
- [61] S. M. Seltzer, "Updated Calculations for Routine Space-Shielding Radiation Dose Estimates: SHIELDOSE-2," *NISTIR 5477*, December 1994.
- [62] P. Truscott, „JORE2M2-Project: SHIELDOSE-2Q - Software User Manual,“ QINETIQ/TS/AS/SUM1003576, Qinetiq Ltd., Mai 2010.
- [63] S. Seltzer, „Conversion of Depth-Dose Distributions from Slab to Spherical Geometries for Space-Shielding Application,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Bd. 33, Nr. 6, pp. 1292 - 1297, Dezember 1986.
- [64] S. Seltzer, *Private Korrespondenz per E-Mail*, 30.03.2011, siehe Anhang D.
- [65] G. Santin, P. Nieminen, H. Evans, E. Daly, F. Lei, P. Truscott, C. Dyer, B. Quaghabeur und D. Heynderickx, „New Geant4 based simulation tools for space radiation shielding and effects analysis,“ *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Bd. 125, pp. 69 - 74, September 2003.
- [66] J. Allison et al., „Geant4 Developments and Applications,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Bd. 53, Nr. 1, pp. 270 - 278, Februar 2006.
- [67] Geant4-Autoren, „Physics Reference Manual - Version: geant4 9.5.0,“ <http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml>, 2. Dezember 2011.
- [68] K. Amako et al., „Comparison of Geant4 Electromagnetic Physics Models Against the NIST Reference Data,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Bd. 52, Nr. 4, pp. 910 - 918, August 2005.

8. Literaturverzeichnis

- [69] F. Lei, P. R. Truscott, C. S. Dyer, B. Quaghebeur, D. Heynderickx, P. Nieminen, H. Evans und E. Daly, „MULASSIS: A Geant4-Based Multilayered Shielding Simulation Tool,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Bd. 49, Nr. 6, pp. 2788 - 2793, Dezember 2002.
- [70] G. Santin, V. Ivanchenko, H. Evans, P. Nieminen und E. Daly, „GRAS: A General-Purpose 3-D Modular Simulation Tool for Space Environment Effects Analysis,“ *IEEE Transactions On Nuclear Science*, Bd. 52, Nr. 6, pp. 2294 - 2299, Dezember 2005.
- [71] R. Chytracek, J. McCormick, W. Pokorski und G. Santin, „Geometry Description Markup Language for Physics Simulation and Analysis Applications,“ January 2007.
- [72] J. H. Adams, D. H. Hathaway, R. N. Grugel, J. W. Watts, T. A. Parnell, J. C. Gregory und R. M. Winglee, „Revolutionary Concepts of Radiation Shielding for Human Exploration of Space,“ NASA, NASA/TM-2005-213688, März 2005.
- [73] R. H. Levy und F. W. French, „Plasma Radiation Shield: Concepts and Applications to Space Vehicles,“ *Journal of Spacecraft and Rockets*, Bd. 5, Nr. 5, pp. 570 - 577, 1968.
- [74] ECSS Secretariat, „Space product assurance - Data for selection of space materials and processes,“ ECSS-Q-70-71A rev. 1, 2004.
- [75] M. R. Shavers, N. Zapp, R. E. Barber, J. W. Wilson, G. Qualis, L. Toupes, S. Ramsey, V. Vinci, G. Smith und F. A. Cucinotta, „Implementation of ALARA radiation protection on the ISS through polyethylene shielding augmentation of the Service Module Crew Quarters,“ *Advances in Space Research*, Bd. 34, Nr. 6, pp. 1333 - 1337, Juni 2004.
- [76] M. Greiner, Materialschichtoptimierung zur Abschirmung von Weltraumstrahlung in gängigen Erdorbits, Universität der Bundeswehr München: Masterarbeit, September 2011.
- [77] ESA - ESTEC (TEC-EES & SRE-PAP), „JUICE Environmental Specification,“ JS-14-09, 31.05.2012.
- [78] B. Kost, Optimierung mit Evolutionsstrategien, Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 2003.
- [79] M. Gasser, Implementierung eines genetischen Algorithmus zur Optimierung von Abschirmungen gegen kosmische Strahlung, Universität der Bundeswehr München: Masterarbeit, August 2013.
- [80] W. Ley, K. Wittmann und W. Hallmann, Handbuch der Raumfahrttechnik, München: Carl Hanser, 2008.
- [81] K. Ruhl, K. Bunte und A. Gaede, „ESABASE2 - Framework; Software User Manual,“ 2009.

8. Literaturverzeichnis

- [82] T. Bitzer, Honeycomb Technology - Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing, 1st Hrsg., Chapman & Hall, 1997.
- [83] ASM International, Metals Handbook - Desk Edition, Second Hrsg., ASM International, 1998.
- [84] W. Keil, *Private Kommunikation*, 03.04.2012.
- [85] D. C. Jensen und J. C. Cain, „An Interim Geomagnetic Field,“ *Journal of Geophysical Research*, Bd. 67, Nr. 9, p. 3568, 1962.
- [86] C. Störmer, „Periodische Elektronenbahnen im Felde eines Elementarmagneten und ihre Anwendung auf Brüches Modellversuche und auf Eisenhagens Elementarwellen des Erdmagnetismus,“ *Zeitschrift für Astrophysik*, Nr. 1, pp. 237 - 274, 1930.
- [87] A. Birnbaum, Die Abschirmwirkung von Satellitenstrukturmaterialien, Universität der Bundeswehr München: Bachelorarbeit, Januar 2013.
- [88] P. Calvel et al., „Review of Deposited Dose Calculation Methods Using Ray Tracing Approximations,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Bd. 55, Nr. 6, pp. 3106 - 3113, Dezember 2008.
- [89] R. Lindberg, G. Santin, H. Evans, E. Daly und P. Nieminen, „Detailed Comparison of Monte Carlo and Sector-Shielding Analyses for Space Applications,“ *IEEE Transactions On Nuclear Science*, Bd. 53, Nr. 6, pp. 3745 - 3749, December 2006.
- [90] W. Mai, T. Schwall und B. Häusler, „JUICE USO Radiation Analysis,“ JUICE-JAS-UBW-AN-3004- I1.1, Oktober 2012.
- [91] G. Santin und M. Ansart, „Investigation on the effects of combinations of shielding materials on the total ionising dose for the LAPLACE Mission,“ TEC-EES/2010.613/GS/2.0, 30.05.2012.
- [92] ESA, „JUICE - Exploring the emergence of habitable worlds around gas giants - Assessment Study Report,“ ESA/SRE(2011)18, Dezember 2011.
- [93] Arianespace, „Arianespace orders 35 Ariane 5 ECA launchers from Astrium,“ 2 Februar 2009. [Online]. Available: <http://www.arianespace.com/news-press-release/2009/02-02-09-launcher-order-from-astrium.asp>.

9 Anhang

A Verwendete Testspektren

Tabelle 41: Das in der Arbeit verwendete Spektrum der Elektronen aus dem Van-Allen-Gürtel nach dem Modell AE8-MAX [36] erstellt mit SPENVIS [20].

Energie [MeV]	Integral		Differenziell	
	Fluss im Durchschnitt der Mission [cm ⁻² s ⁻¹]	Totale Fluenz der Mission [cm ⁻²]	Fluss im Durchschnitt der Mission [cm ⁻² MeV ⁻¹ s ⁻¹]	Totale Fluenz der Mission [cm ⁻² MeV ⁻¹]
4.00E-02	6.59E+08	2.08E+17	1.14E+10	3.59E+18
0.1	1.47E+08	4.65E+16	5.65E+09	1.78E+18
0.2	5.95E+07	1.88E+16	5.62E+08	1.77E+17
0.3	3.49E+07	1.10E+16	1.72E+08	5.42E+16
0.4	2.52E+07	7.94E+15	8.59E+07	2.71E+16
0.5	1.77E+07	5.59E+15	5.39E+07	1.70E+16
0.6	1.44E+07	4.54E+15	3.01E+07	9.50E+15
0.7	1.17E+07	3.69E+15	2.47E+07	7.78E+15
0.8	9.47E+06	2.99E+15	2.04E+07	6.44E+15
1	6.14E+06	1.94E+15	1.38E+07	4.36E+15
1.25	3.55E+06	1.12E+15	8.48E+06	2.67E+15
1.5	1.90E+06	6.00E+14	4.91E+06	1.55E+15
1.75	1.10E+06	3.47E+14	2.60E+06	8.20E+14
2	6.04E+05	1.91E+14	1.65E+06	5.20E+14
2.25	2.74E+05	8.65E+13	9.74E+05	3.07E+14
2.5	1.17E+05	3.69E+13	4.36E+05	1.37E+14
2.75	5.66E+04	1.78E+13	1.80E+05	5.67E+13
3	2.70E+04	8.53E+12	8.61E+04	2.72E+13
3.25	1.35E+04	4.26E+12	4.06E+04	1.28E+13
3.5	6.74E+03	2.13E+12	2.15E+04	6.76E+12
3.75	2.78E+03	8.75E+11	1.12E+04	3.53E+12
4	1.14E+03	3.61E+11	4.67E+03	1.47E+12
4.25	4.43E+02	1.40E+11	1.94E+03	6.13E+11
4.5	1.72E+02	5.42E+10	8.37E+02	2.64E+11
4.75	2.49E+01	7.86E+09	3.36E+02	1.06E+11
5	3.61E+00	1.14E+09	5.92E+01	1.87E+10
5.5	0.00E+00	0.00E+00	3.61E+00	1.14E+09
6	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

9. Anhang

Tabelle 42: Das für den in der Arbeit verwendeten geostationären Orbit bestimmte Spektrum der Protonen aus dem Van-Allen-Gürtel nach dem Modell AP8-MAX [32] erstellt mit SPENVIS [20].

Energie [MeV]	Integral		Differenziell	
	Fluss im Durchschnitt der Mission [cm ⁻² s ⁻¹]	Totale Fluenz der Mission [cm ⁻²]	Fluss im Durchschnitt der Mission [cm ⁻² MeV ⁻¹ s ⁻¹]	Totale Fluenz der Mission [cm ⁻² MeV ⁻¹]
0.1	4.01E+06	1.26E+15	5.30E+07	1.67E+16
0.15	1.91E+06	6.01E+14	3.10E+07	9.77E+15
0.2	9.08E+05	2.86E+14	1.52E+07	4.80E+15
0.3	3.43E+05	1.08E+14	3.89E+06	1.23E+15
0.4	1.30E+05	4.09E+13	1.43E+06	4.50E+14
0.5	5.72E+04	1.81E+13	5.21E+05	1.64E+14
0.6	2.53E+04	7.98E+12	2.32E+05	7.30E+13
0.7	1.09E+04	3.45E+12	1.16E+05	3.66E+13
1	8.03E+02	2.53E+11	2.17E+04	6.84E+12
1.5	9.55E+00	3.01E+09	8.03E+02	2.53E+11
2	0.00E+00	0.00E+00	1.27E+01	4.01E+09
3	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
4	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

9. Anhang

Tabelle 43: Das in der Arbeit verwendete Fluenzspektrum für solare Protonen nach dem ESP-Modell [24] erstellt mit SPENVIS [20].

Energie [MeV]	Integral [cm ⁻²]	Differenziell [cm ⁻² MeV ⁻¹]
0.1	4.62E+12	2.88E+13
0.11	4.35E+12	2.51E+13
0.12	4.11E+12	2.18E+13
0.14	3.72E+12	1.70E+13
0.16	3.42E+12	1.36E+13
0.18	3.17E+12	1.12E+13
0.2	2.96E+12	9.42E+12
0.22	2.79E+12	8.06E+12
0.25	2.57E+12	6.55E+12
0.28	2.39E+12	5.44E+12
0.32	2.19E+12	4.36E+12
0.35	2.07E+12	3.76E+12
0.4	1.90E+12	3.03E+12
0.45	1.76E+12	2.49E+12
0.5	1.65E+12	2.09E+12
0.55	1.55E+12	1.79E+12
0.63	1.42E+12	1.44E+12
0.71	1.32E+12	1.18E+12
0.8	1.22E+12	9.71E+11
0.9	1.13E+12	7.99E+11
1	1.06E+12	6.71E+11
1.1	9.94E+11	5.73E+11
1.2	9.41E+11	4.99E+11
1.4	8.52E+11	3.90E+11
1.6	7.82E+11	3.12E+11
1.8	7.25E+11	2.56E+11
2	6.78E+11	2.15E+11
2.2	6.38E+11	1.84E+11
2.5	5.88E+11	1.50E+11
2.8	5.46E+11	1.27E+11
3.2	4.99E+11	1.09E+11
3.5	4.68E+11	9.61E+10
4	4.25E+11	7.66E+10
4.5	3.90E+11	6.24E+10
5	3.61E+11	5.46E+10
5.5	3.35E+11	4.90E+10
6.3	3.00E+11	3.87E+10
7.1	2.72E+11	3.25E+10

Energie [MeV]	Integral [cm ⁻²]	Differenziell [cm ⁻² MeV ⁻¹]
8	2.45E+11	2.74E+10
9	2.20E+11	2.19E+10
10	2.00E+11	1.90E+10
11	1.82E+11	1.69E+10
12	1.66E+11	1.42E+10
14	1.41E+11	1.08E+10
16	1.22E+11	8.66E+09
18	1.06E+11	6.94E+09
20	9.34E+10	5.73E+09
22	8.28E+10	4.87E+09
25	6.98E+10	3.76E+09
28	5.96E+10	3.04E+09
32	4.90E+10	2.26E+09
35	4.28E+10	1.86E+09
40	3.47E+10	1.40E+09
45	2.85E+10	1.07E+09
50	2.37E+10	8.28E+08
55	2.00E+10	6.61E+08
63	1.55E+10	4.70E+08
71	1.23E+10	3.41E+08
80	9.60E+09	2.48E+08
90	7.46E+09	1.78E+08
100	5.92E+09	1.30E+08
110	4.79E+09	9.60E+07
120	3.94E+09	7.36E+07
140	2.74E+09	4.66E+07
160	1.98E+09	3.00E+07
180	1.48E+09	2.01E+07
200	1.13E+09	1.41E+07
220	8.90E+08	1.03E+07
250	6.34E+08	6.72E+06
280	4.65E+08	4.57E+06
320	3.18E+08	2.75E+06
350	2.48E+08	1.96E+06
400	1.69E+08	1.20E+06
450	1.20E+08	7.63E+05
500	8.94E+07	4.47E+05

9. Anhang

Tabelle 44: Die differenziellen Flüsse der Elektronen des Jupiterstrahlungsgürtels in der JUICE-Mission aus [77]. In den Rechnungen wurde der zeitlich gemittelte Fluss in der letzten Spalte benutzt.

Energie [MeV]	Differenzieller Elektronen-Fluss [cm ⁻² sr ⁻¹ MeV ⁻¹ s ⁻¹]						
	Transfer Europa	Europa Phase	Jupiter Callisto	HL	Transfer Ganymed	Ganymed Phase	Gemittelt
0.02	1.22E+07	3.86E+07	2.74E+07		5.59E+07	1.42E+08	5.56E+07
0.03	1.30E+07	3.51E+07	2.77E+07		5.91E+07	1.89E+08	6.75E+07
0.05	8.15E+06	2.10E+07	1.57E+07		3.19E+07	1.36E+08	4.49E+07
0.07	5.07E+06	1.45E+07	9.40E+06		1.91E+07	7.86E+07	2.63E+07
0.1	2.83E+06	8.64E+06	5.03E+06		1.03E+07	4.32E+07	1.44E+07
0.2	8.92E+05	2.76E+06	1.46E+06		2.89E+06	1.40E+07	4.53E+06
0.3	4.47E+05	1.45E+06	7.12E+05		1.39E+06	6.85E+06	2.22E+06
0.5	2.30E+05	7.73E+05	3.47E+05		6.62E+05	3.31E+06	1.08E+06
0.7	1.70E+05	5.99E+05	2.44E+05		4.47E+05	2.29E+06	7.49E+05
1	6.06E+04	2.41E+05	8.38E+04		1.47E+05	7.76E+05	2.55E+05
2	8.19E+03	4.61E+04	1.09E+04		1.72E+04	9.17E+04	3.11E+04
3	2.62E+03	1.76E+04	3.29E+03		4.83E+03	2.71E+04	9.33E+03
5	6.46E+02	4.67E+03	7.23E+02		9.57E+02	6.33E+03	2.16E+03
7	2.59E+02	1.96E+03	2.70E+02		3.31E+02	2.44E+03	8.30E+02
10	9.87E+01	7.84E+02	9.58E+01		1.07E+02	8.84E+02	3.01E+02
20	1.27E+01	1.16E+02	1.01E+01		8.16E+00	9.51E+01	3.31E+01
30	2.59E+00	2.51E+01	1.87E+00		1.22E+00	1.68E+01	6.06E+00
50	3.77E-01	3.72E+00	2.57E-01		1.41E-01	1.92E+00	7.52E-01
70	1.15E-01	1.07E+00	8.00E-02		4.63E-02	4.70E-01	2.02E-01
100	3.74E-02	2.89E-01	2.80E-02		1.91E-02	1.11E-01	5.56E-02
200	6.76E-03	2.59E-02	6.05E-03		5.43E-03	9.59E-03	7.52E-03
300	3.11E-03	7.36E-03	2.95E-03		2.83E-03	3.26E-03	3.17E-03
500	1.30E-03	1.94E-03	1.28E-03		1.26E-03	1.16E-03	1.27E-03
700	7.54E-04	9.38E-04	7.47E-04		7.43E-04	6.45E-04	7.30E-04
1000	4.27E-04	4.76E-04	4.25E-04		4.24E-04	3.59E-04	4.12E-04

B Ergebnisse der Wabenkernsandwichberechnungen

Tabelle 45: Dosen für verschiedene Gesamtdicken der Sandwichanordnung.

Gesamtdicke			10 mm			20 mm		
	Spektrum	Konfiguration	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Target 1	Sol. P ⁺	Platte	1.14E+04	2.27E+02	1.98%	7.40E+03	1.05E+02	1.43%
		Waben	1.12E+04	2.12E+02	1.89%	7.67E+03	1.08E+02	1.41%
	Van-Allen e ⁻	Platte	7.09E+06	1.61E+05	2.27%	4.37E+06	6.33E+04	1.45%
		Waben	7.32E+06	6.10E+04	0.83%	4.60E+06	6.37E+04	1.38%
Target 2	Sol. P ⁺	Platte	1.79E+04	3.03E+02	1.70%	1.45E+04	1.50E+02	1.04%
		Waben	1.75E+04	2.63E+02	1.50%	1.47E+04	1.50E+02	1.02%
	Van-Allen e ⁻	Platte	1.01E+07	1.91E+05	1.90%	8.42E+06	8.79E+04	1.04%
		Waben	1.03E+07	7.21E+04	0.70%	8.35E+06	8.72E+04	1.04%

Gesamtdicke			30 mm		
	Spektrum	Konfiguration	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Target 1	Sol. P ⁺	Platte	5.34E+03	1.15E+02	2.15%
		Waben	5.49E+03	1.17E+02	2.12%
	Van-Allen e ⁻	Platte	2.96E+06	4.07E+04	1.38%
		Waben	3.16E+06	3.16E+04	1.00%
Target 2	Sol. P ⁺	Platte	1.19E+04	1.70E+02	1.43%
		Waben	1.19E+04	1.69E+02	1.43%
	Van-Allen e ⁻	Platte	6.76E+06	6.23E+04	0.92%
		Waben	6.71E+06	4.67E+04	0.70%

Tabelle 46: Abweichungen zwischen Wabenkern- und Äquivalentplattenanordnung und statistischer Fehler nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz.

Meßpunkt	Spektrum	10 mm	F(Gauß)	20 mm	F(Gauß)	30 mm	F(Gauß)
Target1	sol. p ⁺	-1.49%	2.78%	3.55%	1.94%	2.83%	2.94%
	Van-Allen e ⁻	3.17%	2.34%	4.97%	1.90%	6.54%	1.59%
Target2	sol. p ⁺	-1.89%	2.31%	0.99%	1.44%	-0.07%	2.02%
	Van-Allen e ⁻	2.11%	1.98%	-0.81%	1.49%	-0.76%	1.16%

9. Anhang

Tabelle 47: Winkelabhängige Dosen durch solare Protonen, Konfiguration: Deckplatte und Äquivalentplatte.

Einfalls- winkel [°]	Dosis T1 [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %	Dosis T 2 [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
2.87	1610.85	31.46	1.95%	1627.80	32.08	1.97%
8.63	1597.50	22.57	1.41%	1631.58	22.28	1.37%
14.48	1472.23	21.49	1.46%	1608.00	22.76	1.42%
20.49	1256.25	24.48	1.95%	1619.19	27.15	1.68%
26.74	999.29	17.12	1.71%	1648.93	22.40	1.36%
33.37	777.32	16.34	2.10%	1668.20	23.82	1.43%
40.54	673.34	13.50	2.00%	1671.85	21.29	1.27%
48.59	616.16	11.47	1.86%	1678.75	19.06	1.14%
58.21	571.32	11.55	2.02%	1680.12	19.85	1.18%
71.81	494.45	12.30	2.49%	325.99	9.76	2.99%
Summe	10068.70	182.29	1.81%	15160.41	220.45	1.45%

Tabelle 48: Winkelabhängige Dosen durch solare Protonen, Konfiguration: Wabensandwichplatte.

Einfalls- winkel [°]	Dosis T1 [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %	Dosis T 2 [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
2.87	1749.50	35.63	2.04%	1742.55	35.90	2.06%
8.63	1660.45	34.59	2.08%	1648.70	34.59	2.10%
14.48	1512.84	30.30	2.00%	1662.01	30.81	1.85%
20.49	1296.98	24.39	1.88%	1694.42	27.15	1.60%
26.74	1040.60	22.15	2.13%	1713.35	27.75	1.62%
33.37	793.83	15.53	1.96%	1680.73	23.07	1.37%
40.54	681.18	13.72	2.01%	1708.65	21.27	1.24%
48.59	617.98	13.01	2.11%	1719.55	21.94	1.28%
58.21	560.42	11.56	2.06%	1678.15	20.20	1.20%
71.81	482.17	12.15	2.52%	345.45	10.21	2.96%
Summe	10395.95	213.05	2.05%	15593.56	252.89	1.62%

9. Anhang

Tabelle 49: Winkelabhängige Dosen durch Van-Allen-Elektronen, Konfiguration: Deckplatte und Äquivalentplatte.

Einfalls- winkel [°]	Dosis T1 [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %	Dosis T 2 [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
2.87	8.59E+05	1.76E+04	2.05%	1.19E+06	2.00E+04	1.68%
8.63	8.69E+05	1.68E+04	1.93%	1.18E+06	1.86E+04	1.57%
14.48	8.12E+05	1.65E+04	2.03%	1.19E+06	2.00E+04	1.67%
20.49	7.17E+05	1.48E+04	2.06%	1.13E+06	1.93E+04	1.71%
26.74	6.50E+05	1.20E+04	1.84%	1.09E+06	1.55E+04	1.41%
33.37	5.70E+05	9.70E+03	1.70%	1.05E+06	1.31E+04	1.25%
40.54	4.76E+05	9.52E+03	2.00%	9.21E+05	1.32E+04	1.43%
48.59	3.82E+05	8.59E+03	2.25%	8.12E+05	1.25E+04	1.54%
58.21	2.69E+05	7.04E+03	2.62%	6.56E+05	1.11E+04	1.69%
71.81	1.68E+05	4.66E+03	2.78%	3.78E+05	6.97E+03	1.85%
Summe	5.77E+06	1.17E+05	2.03%	9.60E+06	1.50E+05	1.56%

Tabelle 50: Winkelabhängige Dosen durch Van-Allen-Elektronen, Konfiguration: Wabensandwichplatte.

Einfalls- winkel [°]	Dosis T1 [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %	Dosis T 2 [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
2.87	9.46E+05	1.87E+04	1.97%	1.25E+06	2.11E+04	1.68%
8.63	8.98E+05	1.83E+04	2.04%	1.25E+06	2.13E+04	1.70%
14.48	8.33E+05	1.71E+04	2.05%	1.21E+06	2.03E+04	1.67%
20.49	7.10E+05	1.48E+04	2.08%	1.19E+06	1.94E+04	1.63%
26.74	6.77E+05	1.37E+04	2.02%	1.12E+06	1.76E+04	1.57%
33.37	5.67E+05	1.19E+04	2.10%	1.05E+06	1.69E+04	1.61%
40.54	4.81E+05	1.44E+04	2.99%	9.50E+05	2.02E+04	2.13%
48.59	3.89E+05	1.15E+04	2.96%	8.18E+05	1.68E+04	2.06%
58.21	2.73E+05	8.15E+03	2.99%	6.37E+05	1.25E+04	1.96%
71.81	1.72E+05	4.19E+03	2.44%	4.00E+05	6.48E+03	1.62%
Summe	5.95E+06	1.33E+05	2.23%	9.88E+06	1.73E+05	1.75%

C Ergebnisse der Berechnungen des Vergleichs GRAS - SSAT

C 1. Tabellarische Werte der verwendeten Tiefendosiskurven

Tabelle 51: Tiefendosisdaten für die durch Van-Allen-Elektronen verursachte Energiedosis inklusive Bremsstrahlung für das Missionsszenario aus Abschnitt 4.3.2, erstellt mit GRAS für eine Vollkugelgeometrie.

Dicke Al, [mm]	Targetradius [mm]	Cutlänge [mm]	Spektrum	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
0.0001	0.1	1.00E-002	>0.1MeV	2.00E+009	3.42E+006	0.17%
0.0005	0.1	1.00E-002	>0.1MeV	2.00E+009	4.26E+006	0.21%
0.001	0.1	1.00E-002	>0.1MeV	1.99E+009	4.32E+006	0.22%
0.005	0.1	1.00E-002	>0.1MeV	1.96E+009	4.80E+006	0.24%
0.01	0.1	1.00E-002	>0.1MeV	1.87E+009	5.29E+006	0.28%
0.05	0.1	1.00E-002	>0.1MeV	9.27E+008	4.23E+006	0.46%
0.1	0.1	1.00E-002	>0.1MeV	3.88E+008	2.58E+006	0.66%
0.2	0.1	1.00E-002	>0.1MeV	1.88E+008	1.47E+006	0.78%
0.3	0.1	1.00E-002	>0.1MeV	1.30E+008	1.21E+006	0.93%
0.4	0.1	1.00E-002	>0.1MeV	9.80E+007	9.11E+005	0.93%
0.5	0.2	1.00E-001	>0.1MeV	6.94E+007	6.65E+005	0.96%
0.6	0.2	1.00E-001	>0.1MeV	5.99E+007	5.72E+005	0.95%
0.7	0.2	1.00E-001	>0.1MeV	5.19E+007	5.19E+005	1.00%
0.8	0.2	1.00E-001	>0.1MeV	4.70E+007	4.18E+005	0.89%
0.9	0.2	1.00E-001	>0.1MeV	4.11E+007	3.89E+005	0.95%
1	0.2	1.00E-001	>0.1MeV	3.58E+007	3.46E+005	0.97%
1.5	0.3	1.00E-001	>0.1MeV	1.76E+007	1.76E+005	1.00%
2	0.4	1.00E-001	>0.1MeV	8.24E+006	8.93E+004	1.08%
3	0.6	1.00E-001	>0.1MeV	1.79E+006	1.79E+004	1.00%
4	0.8	1.00E-001	>0.1MeV	3.23E+005	4.63E+003	1.43%
5	1	1.00E-001	>0.5MeV	7.03E+004	1.43E+003	2.04%
6	1.2	1.00E-001	>0.5MeV	1.85E+004	4.78E+002	2.59%
7	1.4	1.00E-001	>0.5MeV	9.06E+003	2.13E+002	2.36%
8	1.6	1.00E-001	>0.5MeV	7.29E+003	1.47E+002	2.01%
9	1.8	1.00E-001	>0.5MeV	6.91E+003	1.11E+002	1.61%
10	2	1.00E-001	>0.5MeV	6.51E+003	7.50E+001	1.15%
12	2.4	1.00E-001	>0.5MeV	5.91E+003	6.62E+001	1.12%
14	2.8	1.00E-001	>0.5MeV	5.63E+003	6.25E+001	1.11%
16	3.2	1.00E-001	>0.5MeV	5.22E+003	4.60E+001	0.88%
18	3.6	1.00E-001	>0.5MeV	4.87E+003	4.44E+001	0.91%
20	4	1.00E-001	>0.5MeV	4.82E+003	4.10E+001	0.85%
25	5	1.00E-001	>0.5MeV	4.32E+003	3.42E+001	0.79%
30	6	1.00E-001	>0.5MeV	3.89E+003	2.19E+001	0.56%
40	8	1.00E-001	>0.5MeV	3.24E+003	3.79E+001	1.17%
50	10	1.00E-001	>0.5MeV	2.68E+003	3.18E+001	1.19%
60	12	1.00E-001	>0.5MeV	2.40E+003	3.39E+001	1.41%
70	14	1.00E-001	>0.5MeV	2.04E+003	3.06E+001	1.50%
80	16	1.00E-001	>0.5MeV	1.72E+003	2.03E+001	1.18%
90	18	1.00E-001	>0.5MeV	1.46E+003	1.85E+001	1.26%
100	20	1.00E-001	>0.5MeV	1.24E+003	2.06E+001	1.66%
125	25	1.00E-001	>0.5MeV	7.97E+002	1.62E+001	2.03%
150	30	1.00E-001	>0.5MeV	4.98E+002	9.04E+000	1.82%
200	40	1.00E-001	>0.5MeV	2.10E+002	3.48E+000	1.66%
300	60	1.00E-001	>0.5MeV	3.83E+001	1.46E+000	3.81%

9. Anhang

Tabelle 52: Tiefendosisdaten für die durch solare Protonen verursachte Energiedosis für das Missionszenario aus Abschnitt 4.3.2, erstellt mit GRAS für eine Vollkugelgeometrie.

Dicke Al, [mm]	Targetradius [mm]	Cutlänge [mm]	Spektrum	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
0.0001	0.1	1.00E-001	>5MeV	2.03E+005	3.70E+002	0.18%
0.0005	0.1	1.00E-001	>5MeV	2.05E+005	3.76E+002	0.18%
0.001	0.1	1.00E-001	>5MeV	2.04E+005	4.69E+002	0.23%
0.005	0.1	1.00E-001	>5MeV	2.07E+005	4.30E+002	0.21%
0.01	0.1	1.00E-001	>5MeV	2.08E+005	5.97E+002	0.29%
0.05	0.1	1.00E-001	>5MeV	2.30E+005	9.60E+002	0.42%
0.1	0.1	1.00E-001	>5MeV	2.54E+005	1.54E+003	0.61%
0.2	0.1	1.00E-001	>5MeV	2.25E+005	1.70E+003	0.76%
0.3	0.1	1.00E-001	>5MeV	1.71E+005	1.54E+003	0.90%
0.4	0.1	1.00E-001	>5MeV	1.42E+005	1.11E+003	0.78%
0.5	0.2	1.00E-001	>5MeV	1.08E+005	6.07E+002	0.56%
0.6	0.2	1.00E-001	>5MeV	9.55E+004	6.48E+002	0.68%
0.7	0.2	1.00E-001	>5MeV	8.44E+004	6.81E+002	0.81%
0.8	0.2	1.00E-001	>5MeV	7.72E+004	7.17E+002	0.93%
0.9	0.2	1.00E-001	>5MeV	6.99E+004	5.28E+002	0.76%
1	0.2	1.00E-001	>5MeV	6.44E+004	5.48E+002	0.85%
1.5	0.3	1.00E-001	>5MeV	4.30E+004	4.13E+002	0.96%
2	0.4	1.00E-001	>5MeV	3.27E+004	2.81E+002	0.86%
3	0.6	1.00E-001	>5MeV	2.13E+004	2.10E+002	0.98%
4	0.8	1.00E-001	>5MeV	1.50E+004	1.44E+002	0.96%
5	1	1.00E-001	>5MeV	1.16E+004	1.08E+002	0.93%
6	1.2	1.00E-001	>5MeV	9.39E+003	8.61E+001	0.92%
7	1.4	1.00E-001	>5MeV	7.74E+003	7.60E+001	0.98%
8	1.6	1.00E-001	>5MeV	6.44E+003	6.23E+001	0.97%
9	1.8	1.00E-001	>5MeV	5.48E+003	5.26E+001	0.96%
10	2	1.00E-001	>5MeV	4.80E+003	4.55E+001	0.95%
12	2.4	1.00E-001	>5MeV	3.73E+003	3.67E+001	0.98%
14	2.8	1.00E-001	>5MeV	3.01E+003	2.93E+001	0.97%
16	3.2	1.00E-001	>5MeV	2.45E+003	2.29E+001	0.93%
18	3.6	1.00E-001	>5MeV	2.08E+003	2.07E+001	1.00%
20	4	1.00E-001	>5MeV	1.78E+003	1.76E+001	0.99%
25	5	1.00E-001	>5MeV	1.25E+003	1.24E+001	0.99%
30	6	1.00E-001	>5MeV	9.30E+002	9.16E+000	0.98%
40	8	1.00E-001	>5MeV	5.75E+002	6.08E+000	1.06%
50	10	1.00E-001	>5MeV	3.92E+002	4.75E+000	1.21%
60	12	1.00E-001	>5MeV	2.80E+002	3.85E+000	1.37%
70	14	1.00E-001	>5MeV	2.11E+002	3.09E+000	1.46%
80	16	1.00E-001	>5MeV	1.64E+002	2.13E+000	1.30%
90	18	1.00E-001	>5MeV	1.31E+002	1.52E+000	1.16%
100	20	1.00E-001	>5MeV	1.07E+002	9.68E-001	0.91%
125	25	1.00E-001	>5MeV	6.88E+001	7.50E-001	1.09%
150	30	1.00E-001	>5MeV	6.93E+001	7.80E-001	1.13%
200	40	1.00E-001	>5MeV	2.43E+001	4.61E-001	1.89%
300	60	1.00E-001	>5MeV	7.77E+000	1.98E-001	2.55%

9. Anhang

Tabelle 53: Tiefendosisdaten für das Missionsszenario aus Abschnitt 4.3.2, erstellt mit SHIELDOSE2-Q in SPENVIS für eine Vollkugelgeometrie.

Abschirmdicke		Totale Dosis	Van-Allen-Elektronen	Bremsstrahlung	Van-Allen-Protonen	Solare Protonen
[g cm ⁻²]	[mm]					
0	0.0001	2.74E+10	1.89E+10	1.81E+07	8.51E+09	2.15E+07
0	0.0005	3.07E+10	1.89E+10	1.93E+07	1.18E+10	2.63E+07
0	0.001	2.66E+10	1.90E+10	2.04E+07	7.53E+09	2.00E+07
0.001	0.005	2.01E+10	1.99E+10	2.70E+07	1.88E+08	5.31E+06
0.003	0.01	2.40E+10	2.40E+10	3.60E+07	2.16E+07	2.93E+06
0.014	0.05	6.74E+09	6.73E+09	1.54E+07	0.00E+00	8.24E+05
0.027	0.1	2.17E+09	2.16E+09	6.03E+06	0.00E+00	4.89E+05
0.054	0.2	7.90E+08	7.87E+08	2.61E+06	0.00E+00	2.89E+05
0.081	0.3	4.88E+08	4.86E+08	1.77E+06	0.00E+00	2.11E+05
0.108	0.4	3.54E+08	3.52E+08	1.36E+06	0.00E+00	1.65E+05
0.135	0.5	2.75E+08	2.74E+08	1.12E+06	0.00E+00	1.37E+05
0.162	0.6	2.23E+08	2.22E+08	9.46E+05	0.00E+00	1.19E+05
0.189	0.7	1.88E+08	1.87E+08	8.28E+05	0.00E+00	1.03E+05
0.216	0.8	1.63E+08	1.62E+08	7.40E+05	0.00E+00	9.14E+04
0.243	0.9	1.43E+08	1.42E+08	6.68E+05	0.00E+00	8.16E+04
0.27	1	1.26E+08	1.26E+08	6.09E+05	0.00E+00	7.37E+04
0.54	2	3.69E+07	3.66E+07	2.76E+05	0.00E+00	3.83E+04
0.81	3	1.10E+07	1.08E+07	1.60E+05	0.00E+00	2.50E+04
1.08	4	2.93E+06	2.80E+06	1.10E+05	0.00E+00	1.82E+04
1.35	5	7.26E+05	6.26E+05	8.57E+04	0.00E+00	1.39E+04
1.62	6	2.32E+05	1.48E+05	7.25E+04	0.00E+00	1.13E+04
1.89	7	1.09E+05	3.62E+04	6.38E+04	0.00E+00	9.39E+03
2.16	8	7.33E+04	7.86E+03	5.75E+04	0.00E+00	7.94E+03
2.43	9	6.09E+04	1.43E+03	5.25E+04	0.00E+00	6.88E+03
2.7	10	5.46E+04	2.13E+02	4.84E+04	0.00E+00	5.96E+03
3.24	12	4.68E+04	1.36E+00	4.21E+04	0.00E+00	4.72E+03
3.78	14	4.12E+04	5.43E-03	3.75E+04	0.00E+00	3.80E+03
4.32	16	3.70E+04	1.20E-05	3.38E+04	0.00E+00	3.15E+03
4.86	18	3.32E+04	0.00E+00	3.06E+04	0.00E+00	2.68E+03
5.4	20	3.04E+04	0.00E+00	2.81E+04	0.00E+00	2.28E+03
6.75	25	2.60E+04	0.00E+00	2.44E+04	0.00E+00	1.64E+03
8.1	30	2.23E+04	0.00E+00	2.10E+04	0.00E+00	1.24E+03
10.8	40	1.64E+04	0.00E+00	1.57E+04	0.00E+00	7.71E+02
13.5	50	1.32E+04	0.00E+00	1.26E+04	0.00E+00	5.38E+02
16.2	60	1.16E+04	0.00E+00	1.12E+04	0.00E+00	3.99E+02
18.9	70	1.07E+04	0.00E+00	1.03E+04	0.00E+00	3.04E+02
21.6	80	9.41E+03	0.00E+00	9.17E+03	0.00E+00	2.38E+02
24.3	90	8.16E+03	0.00E+00	7.97E+03	0.00E+00	1.93E+02
27	100	7.05E+03	0.00E+00	6.89E+03	0.00E+00	1.58E+02
33.75	125	4.07E+03	0.00E+00	3.97E+03	0.00E+00	1.06E+02
40.5	150	2.16E+03	0.00E+00	2.08E+03	0.00E+00	7.48E+01
54	200	6.52E+02	0.00E+00	6.10E+02	0.00E+00	4.23E+01
81	300	1.94E+02	0.00E+00	1.79E+02	0.00E+00	1.49E+01

C 2. Ergebnisse der GRAS-Simulationen

Tabelle 54: Ergebnisse der GRAS-Simulationen für einfache geometrische Körper und solare Protonen.

Form	Dicke [mm Al eq.]	Größe [mm]	Material	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Kugel	1	10	Al	1x1x0.01	7.97E+04	4.10E+03	5.15%
	2	10	Al	1x1x0.01	3.90E+04	1.99E+03	5.11%
	1	100	Al	10x10x0.01	7.35E+04	3.49E+03	4.75%
	5	100	Al	10x10x0.01	1.45E+04	6.98E+02	4.82%
	10	100	Al	10x10x0.01	5.87E+03	2.90E+02	4.94%
	1	10	Pb	1x1x0.01	1.28E+05	5.63E+03	4.41%
	2	10	Pb	1x1x0.01	6.68E+04	3.01E+03	4.51%
	1	100	Pb	10x10x0.01	1.41E+05	5.67E+03	4.01%
	5	100	Pb	10x10x0.01	2.75E+04	1.37E+03	4.97%
	10	100	Pb	10x10x0.01	1.18E+04	5.22E+02	4.42%
Box	1	10	Al	1x1x0.01	6.21E+04	2.79E+03	4.49%
	2	10	Al	1x1x0.01	2.98E+04	1.48E+03	4.98%
	1	100	Al	10x10x0.01	5.88E+04	2.21E+03	3.76%
	5	100	Al	10x10x0.01	1.10E+04	5.47E+02	4.96%
	10	100	Al	10x10x0.01	3.95E+03	1.97E+02	4.98%
	1	10	Pb	1x1x0.01	1.13E+05	5.49E+03	4.86%
	2	10	Pb	1x1x0.01	5.59E+04	2.79E+03	4.99%
	1	100	Pb	10x10x0.01	1.18E+05	5.72E+03	4.84%
	5	100	Pb	10x10x0.01	2.26E+04	9.00E+02	3.99%
	10	100	Pb	10x10x0.01	9.35E+03	4.19E+02	4.48%
Zylinder	1	10	Al	1x1x0.01	6.38E+04	3.19E+03	5.00%
	2	10	Al	1x1x0.01	3.17E+04	1.58E+03	5.00%
	1	100	Al	10x10x0.01	6.09E+04	2.85E+03	4.67%
	5	100	Al	10x10x0.01	1.12E+04	5.58E+02	5.00%
	10	100	Al	10x10x0.01	4.97E+03	2.48E+02	5.00%
	1	10	Pb	1x1x0.01	1.26E+05	6.07E+03	4.83%
	2	10	Pb	1x1x0.01	7.11E+04	3.55E+03	5.00%
	1	100	Pb	10x10x0.01	1.23E+05	6.13E+03	5.00%
	5	100	Pb	10x10x0.01	2.57E+04	1.21E+03	4.70%
	10	100	Pb	10x10x0.01	1.10E+04	5.79E+02	5.27%

9. Anhang

Tabelle 55: Ergebnisse der GRAS-Simulationen für einfache geometrische Körper und Van-Allen-Elektronen.

Form	Dicke [mm Al eq.]	Größe [mm]	Material	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Kugel	1	10	Al	1x1x0.01	2.33E+07	1.10E+06	4.73%
	2	10	Al	1x1x0.01	5.27E+06	2.56E+05	4.85%
	1	100	Al	10x10x0.01	2.00E+07	9.30E+05	4.65%
	5	100	Al	10x10x0.01	4.33E+04	2.14E+03	4.95%
	10	100	Al	10x10x0.01	6.22E+03	2.89E+02	4.64%
	1	10	Pb	1x1x0.01	9.70E+06	5.34E+05	5.51%
	2	10	Pb	1x1x0.01	1.08E+06	4.59E+04	4.23%
	1	100	Pb	10x10x0.01	8.81E+06	4.25E+05	4.83%
	5	100	Pb	10x10x0.01	5.66E+04	2.84E+03	5.01%
	10	100	Pb	10x10x0.01	2.57E+04	1.22E+03	4.74%
Box	1	10	Al	1x1x0.01	1.83E+07	1.05E+06	5.74%
	2	10	Al	1x1x0.01	4.24E+06	2.48E+05	5.86%
	1	100	Al	10x10x0.01	1.85E+07	1.05E+06	5.69%
	5	100	Al	10x10x0.01	3.81E+04	1.62E+03	4.26%
	10	100	Al	10x10x0.01	5.67E+03	2.66E+02	4.69%
	1	10	Pb	1x1x0.01	1.01E+07	5.10E+05	5.06%
	2	10	Pb	1x1x0.01	1.26E+06	6.75E+04	5.35%
	1	100	Pb	10x10x0.01	9.52E+06	4.70E+05	4.94%
	5	100	Pb	10x10x0.01	5.59E+04	2.71E+03	4.86%
	10	100	Pb	10x10x0.01	3.28E+04	1.44E+03	4.40%
Zylinder	1	10	Al	1x1x0.01	2.23E+07	1.05E+06	4.72%
	2	10	Al	1x1x0.01	4.42E+06	2.21E+05	4.99%
	1	100	Al	10x10x0.01	1.81E+07	7.96E+05	4.39%
	5	100	Al	10x10x0.01	3.81E+04	1.93E+03	5.08%
	10	100	Al	10x10x0.01	5.93E+03	2.70E+02	4.55%
	1	10	Pb	1x1x0.01	9.76E+06	4.60E+05	4.71%
	2	10	Pb	1x1x0.01	1.15E+06	5.66E+04	4.92%
	1	100	Pb	10x10x0.01	1.01E+07	4.33E+05	4.30%
	5	100	Pb	10x10x0.01	5.00E+04	2.35E+03	4.70%
	10	100	Pb	10x10x0.01	2.73E+04	1.28E+03	4.70%

9. Anhang

Tabelle 56: Ergebnisse der GRAS-Simulationen für den Satelliten mit 10 Volumina in verschiedenen Konfigurationen und solare Protonen. Die Positionsangaben des Targets beziehen sich auf ein Koordinatensystem mit Ursprung in der Mitte des Satelliten.

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
0/0/0	1	1	80x150x0.01	7.59E+03	3.76E+02	4.95%
	1	3	80x150x0.01	8.24E+03	4.23E+02	5.13%
	1	5	80x150x0.01	8.27E+03	4.10E+02	4.96%
	3	1	80x150x0.01	8.53E+03	2.72E+02	3.19%
	3	3	80x150x0.01	8.93E+03	4.28E+02	4.79%
	3	5	80x150x0.01	9.94E+03	4.02E+02	4.04%
	5	1	80x150x0.01	8.98E+03	3.78E+02	4.21%
	5	3	80x150x0.01	1.07E+04	5.10E+02	4.77%
	5	5	80x150x0.01	1.10E+04	3.61E+02	3.30%
1/0/0	1	1	0.01x100x100	2.68E+04	1.02E+03	3.81%
	1	3	0.01x100x100	2.85E+04	1.02E+03	3.60%
	1	5	0.01x100x100	3.67E+04	1.02E+03	2.78%
	3	1	0.01x100x100	2.64E+04	1.15E+03	4.35%
	3	3	0.01x100x100	3.01E+04	1.27E+03	4.23%
	3	5	0.01x100x100	3.94E+04	1.85E+03	4.70%
	5	1	0.01x100x100	2.60E+04	1.27E+03	4.86%
	5	3	0.01x100x100	3.20E+04	1.59E+03	4.98%
	5	5	0.01x100x100	3.74E+04	1.80E+03	4.80%
0/1/0	1	1	100x0.01x100	1.58E+04	3.62E+02	2.30%
	1	3	100x0.01x100	1.83E+04	5.22E+02	2.86%
	1	5	100x0.01x100	2.38E+04	1.10E+03	4.63%
	3	1	100x0.01x100	1.80E+04	3.24E+02	1.80%
	3	3	100x0.01x100	2.00E+04	1.03E+03	5.17%
	3	5	100x0.01x100	2.40E+04	5.32E+02	2.22%
	5	1	100x0.01x100	1.82E+04	5.49E+02	3.01%
	5	3	100x0.01x100	1.99E+04	5.63E+02	2.83%
	5	5	100x0.01x100	2.74E+04	1.28E+03	4.68%
1/1/1	1	1	100x100x0.01	3.39E+04	1.63E+03	4.81%
	1	3	100x100x0.01	4.43E+04	2.03E+03	4.60%
	1	5	100x100x0.01	6.05E+04	2.45E+03	4.04%
	3	1	100x100x0.01	3.46E+04	1.53E+03	4.41%
	3	3	100x100x0.01	4.49E+04	2.20E+03	4.90%
	3	5	100x100x0.01	5.99E+04	2.91E+03	4.86%
	5	1	100x100x0.01	3.61E+04	1.80E+03	4.98%
	5	3	100x100x0.01	4.33E+04	2.08E+03	4.80%
	5	5	100x100x0.01	5.83E+04	2.69E+03	4.61%

9. Anhang

Tabelle 57: Ergebnisse der GRAS-Simulationen für den Satelliten mit 10 Volumina in verschiedenen Konfigurationen und Van-Allen-Elektronen. Die Positionsangaben des Targets beziehen sich auf ein Koordinatensystem mit Ursprung in der Mitte des Satelliten.

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
0/0/0	1	1	80x150x0.01	6.20E+05	3.03E+04	4.88%
	1	3	80x150x0.01	1.09E+06	5.18E+04	4.77%
	1	5	80x150x0.01	1.30E+06	6.08E+04	4.66%
	3	1	80x150x0.01	8.33E+05	4.07E+04	4.89%
	3	3	80x150x0.01	1.36E+06	6.74E+04	4.97%
	3	5	80x150x0.01	1.87E+06	8.55E+04	4.57%
	5	1	80x150x0.01	8.98E+05	4.12E+04	4.59%
	5	3	80x150x0.01	1.47E+06	7.05E+04	4.80%
	5	5	80x150x0.01	1.88E+06	9.07E+04	4.83%
1/0/0	1	1	0.01x100x100	8.16E+06	3.28E+05	4.01%
	1	3	0.01x100x100	1.66E+07	8.07E+05	4.87%
	1	5	0.01x100x100	2.32E+07	1.14E+06	4.93%
	3	1	0.01x100x100	8.30E+06	3.26E+05	3.93%
	3	3	0.01x100x100	1.57E+07	6.37E+05	4.06%
	3	5	0.01x100x100	2.23E+07	1.04E+06	4.66%
	5	1	0.01x100x100	8.22E+06	3.25E+05	3.95%
	5	3	0.01x100x100	1.72E+07	7.10E+05	4.14%
	5	5	0.01x100x100	2.49E+07	7.59E+05	3.05%
0/1/0	1	1	100x0.01x100	5.37E+06	2.29E+05	4.27%
	1	3	100x0.01x100	9.86E+06	4.42E+05	4.48%
	1	5	100x0.01x100	1.49E+07	7.16E+05	4.81%
	3	1	100x0.01x100	5.87E+06	2.69E+05	4.58%
	3	3	100x0.01x100	1.12E+07	5.54E+05	4.94%
	3	5	100x0.01x100	1.73E+07	6.74E+05	3.89%
	5	1	100x0.01x100	5.78E+06	2.76E+05	4.78%
	5	3	100x0.01x100	1.20E+07	6.00E+05	4.99%
	5	5	100x0.01x100	1.90E+07	7.21E+05	3.79%
1/1/1	1	1	100x100x0.01	1.48E+07	6.88E+05	4.66%
	1	3	100x100x0.01	2.47E+07	7.23E+05	2.92%
	1	5	100x100x0.01	3.92E+07	9.16E+05	2.34%
	3	1	100x100x0.01	1.43E+07	6.88E+05	4.81%
	3	3	100x100x0.01	2.59E+07	8.07E+05	3.12%
	3	5	100x100x0.01	3.81E+07	9.03E+05	2.37%
	5	1	100x100x0.01	1.34E+07	6.63E+05	4.96%
	5	3	100x100x0.01	2.49E+07	9.23E+05	3.70%
	5	5	100x100x0.01	3.52E+07	1.44E+06	4.09%

9. Anhang

Tabelle 58: Ergebnisse der GRAS-Simulationen für den Satelliten mit 100 Volumina in verschiedenen Konfigurationen und solare Protonen.

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	1	2	100x100x0.01	1.43E+04	2.69E+02	1.88%
Det_3_2	1	2	100x100x0.01	1.28E+04	3.32E+02	2.60%
Det_3_3	1	2	100x100x0.01	1.09E+04	2.97E+02	2.73%
Det_4_1	1	2	100x100x0.01	7.88E+03	2.94E+02	3.74%
Det_4_2	1	2	100x100x0.01	8.19E+03	1.41E+02	1.72%
Det_4_3	1	2	100x100x0.01	3.60E+03	1.46E+02	4.06%
Det_4_4	1	2	100x100x0.01	1.25E+04	2.89E+02	2.32%
Det_5_1	1	2	100x100x0.01	9.63E+03	2.50E+02	2.60%
Det_5_2	1	2	100x100x0.01	1.38E+04	3.14E+02	2.27%
Det_5_3	1	2	100x100x0.01	1.21E+04	2.51E+02	2.08%
Det_5_4	1	2	100x100x0.01	8.86E+03	2.56E+02	2.89%
Det_6_1	1	2	100x100x0.01	7.14E+03	2.60E+02	3.65%
Det_6_2	1	2	100x100x0.01	9.48E+03	1.83E+02	1.93%
Det_6_3	1	2	100x100x0.01	1.25E+04	2.50E+02	2.00%
Det_7_1	1	2	100x100x0.01	8.78E+03	2.92E+02	3.33%
Det_7_2	1	2	100x100x0.01	9.53E+03	2.13E+02	2.23%
Det_8_1	1	2	100x100x0.01	3.62E+04	4.85E+02	1.34%
Det_3_1	1	5	100x100x0.01	1.60E+04	3.02E+02	1.89%
Det_3_2	1	5	100x100x0.01	1.46E+04	3.32E+02	2.28%
Det_3_3	1	5	100x100x0.01	1.29E+04	2.92E+02	2.26%
Det_4_1	1	5	100x100x0.01	9.05E+03	3.02E+02	3.34%
Det_4_2	1	5	100x100x0.01	9.35E+03	1.56E+02	1.67%
Det_4_3	1	5	100x100x0.01	3.90E+03	1.12E+02	2.86%
Det_4_4	1	5	100x100x0.01	1.45E+04	2.42E+02	1.68%
Det_5_1	1	5	100x100x0.01	1.06E+04	1.89E+02	1.78%
Det_5_2	1	5	100x100x0.01	1.52E+04	3.42E+02	2.25%
Det_5_3	1	5	100x100x0.01	1.40E+04	2.96E+02	2.11%
Det_5_4	1	5	100x100x0.01	9.75E+03	2.87E+02	2.94%
Det_6_1	1	5	100x100x0.01	8.39E+03	2.44E+02	2.90%
Det_6_2	1	5	100x100x0.01	1.10E+04	1.68E+02	1.53%
Det_6_3	1	5	100x100x0.01	1.42E+04	2.50E+02	1.76%
Det_7_1	1	5	100x100x0.01	9.80E+03	2.88E+02	2.94%
Det_7_2	1	5	100x100x0.01	1.05E+04	2.33E+02	2.22%
Det_8_1	1	5	100x100x0.01	3.62E+04	5.03E+02	1.39%
Det_3_1	1	9	100x100x0.01	1.68E+04	3.89E+02	2.32%
Det_3_2	1	9	100x100x0.01	1.46E+04	3.19E+02	2.19%
Det_3_3	1	9	100x100x0.01	1.20E+04	2.75E+02	2.29%
Det_4_1	1	9	100x100x0.01	8.86E+03	2.96E+02	3.34%
Det_4_2	1	9	100x100x0.01	9.35E+03	1.70E+02	1.82%
Det_4_3	1	9	100x100x0.01	4.53E+03	2.03E+02	4.48%
Det_4_4	1	9	100x100x0.01	1.47E+04	2.95E+02	2.01%
Det_5_1	1	9	100x100x0.01	1.05E+04	1.81E+02	1.73%
Det_5_2	1	9	100x100x0.01	1.47E+04	3.14E+02	2.13%
Det_5_3	1	9	100x100x0.01	1.41E+04	2.76E+02	1.96%
Det_5_4	1	9	100x100x0.01	9.26E+03	2.36E+02	2.55%
Det_6_1	1	9	100x100x0.01	8.09E+03	2.45E+02	3.02%
Det_6_2	1	9	100x100x0.01	1.11E+04	1.71E+02	1.55%
Det_6_3	1	9	100x100x0.01	1.42E+04	2.54E+02	1.79%
Det_7_1	1	9	100x100x0.01	9.74E+03	2.66E+02	2.73%
Det_7_2	1	9	100x100x0.01	1.05E+04	2.27E+02	2.17%
Det_8_1	1	9	100x100x0.01	3.65E+04	5.17E+02	1.42%

9. Anhang

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	3	2	100x100x0.01	1.45E+04	3.05E+02	2.11%
Det_3_2	3	2	100x100x0.01	1.30E+04	3.31E+02	2.53%
Det_3_3	3	2	100x100x0.01	1.05E+04	2.66E+02	2.53%
Det_4_1	3	2	100x100x0.01	7.61E+03	2.22E+02	2.92%
Det_4_2	3	2	100x100x0.01	8.17E+03	1.35E+02	1.65%
Det_4_3	3	2	100x100x0.01	3.59E+03	9.93E+01	2.77%
Det_4_4	3	2	100x100x0.01	1.26E+04	2.54E+02	2.01%
Det_5_1	3	2	100x100x0.01	8.97E+03	1.50E+02	1.67%
Det_5_2	3	2	100x100x0.01	1.35E+04	2.74E+02	2.03%
Det_5_3	3	2	100x100x0.01	1.22E+04	2.57E+02	2.10%
Det_5_4	3	2	100x100x0.01	8.60E+03	2.54E+02	2.95%
Det_6_1	3	2	100x100x0.01	7.35E+03	2.24E+02	3.05%
Det_6_2	3	2	100x100x0.01	9.56E+03	1.79E+02	1.88%
Det_6_3	3	2	100x100x0.01	1.22E+04	2.12E+02	1.74%
Det_7_1	3	2	100x100x0.01	8.33E+03	2.44E+02	2.93%
Det_7_2	3	2	100x100x0.01	9.46E+03	2.69E+02	2.85%
Det_8_1	3	2	100x100x0.01	3.63E+04	4.77E+02	1.31%
Det_3_1	3	5	100x100x0.01	1.63E+04	2.97E+02	1.82%
Det_3_2	3	5	100x100x0.01	1.41E+04	2.63E+02	1.87%
Det_3_3	3	5	100x100x0.01	1.21E+04	2.87E+02	2.37%
Det_4_1	3	5	100x100x0.01	8.61E+03	2.53E+02	2.94%
Det_4_2	3	5	100x100x0.01	8.98E+03	1.48E+02	1.65%
Det_4_3	3	5	100x100x0.01	3.99E+03	1.02E+02	2.55%
Det_4_4	3	5	100x100x0.01	1.46E+04	2.83E+02	1.95%
Det_5_1	3	5	100x100x0.01	1.02E+04	1.70E+02	1.67%
Det_5_2	3	5	100x100x0.01	1.45E+04	2.52E+02	1.74%
Det_5_3	3	5	100x100x0.01	1.43E+04	2.87E+02	2.01%
Det_5_4	3	5	100x100x0.01	9.17E+03	2.17E+02	2.37%
Det_6_1	3	5	100x100x0.01	8.66E+03	3.08E+02	3.56%
Det_6_2	3	5	100x100x0.01	1.05E+04	1.59E+02	1.52%
Det_6_3	3	5	100x100x0.01	1.42E+04	2.73E+02	1.93%
Det_7_1	3	5	100x100x0.01	9.54E+03	2.83E+02	2.96%
Det_7_2	3	5	100x100x0.01	1.11E+04	2.66E+02	2.40%
Det_8_1	3	5	100x100x0.01	3.55E+04	4.70E+02	1.32%
Det_3_1	3	9	100x100x0.01	1.59E+04	2.45E+02	1.54%
Det_3_2	3	9	100x100x0.01	1.43E+04	2.80E+02	1.96%
Det_3_3	3	9	100x100x0.01	1.24E+04	3.21E+02	2.59%
Det_4_1	3	9	100x100x0.01	9.09E+03	2.93E+02	3.23%
Det_4_2	3	9	100x100x0.01	9.23E+03	1.42E+02	1.54%
Det_4_3	3	9	100x100x0.01	4.13E+03	1.32E+02	3.19%
Det_4_4	3	9	100x100x0.01	1.46E+04	2.74E+02	1.88%
Det_5_1	3	9	100x100x0.01	1.07E+04	2.10E+02	1.96%
Det_5_2	3	9	100x100x0.01	1.48E+04	3.31E+02	2.23%
Det_5_3	3	9	100x100x0.01	1.42E+04	2.90E+02	2.04%
Det_5_4	3	9	100x100x0.01	9.65E+03	2.42E+02	2.51%
Det_6_1	3	9	100x100x0.01	8.07E+03	2.20E+02	2.73%
Det_6_2	3	9	100x100x0.01	1.08E+04	1.67E+02	1.56%
Det_6_3	3	9	100x100x0.01	1.41E+04	2.65E+02	1.88%
Det_7_1	3	9	100x100x0.01	9.47E+03	2.52E+02	2.66%
Det_7_2	3	9	100x100x0.01	1.04E+04	1.96E+02	1.88%
Det_8_1	3	9	100x100x0.01	3.57E+04	5.21E+02	1.46%

9. Anhang

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	9	2	100x100x0.01	1.43E+04	2.61E+02	1.83%
Det_3_2	9	2	100x100x0.01	1.29E+04	3.40E+02	2.63%
Det_3_3	9	2	100x100x0.01	1.06E+04	3.19E+02	3.00%
Det_4_1	9	2	100x100x0.01	7.36E+03	2.34E+02	3.17%
Det_4_2	9	2	100x100x0.01	8.18E+03	1.38E+02	1.69%
Det_4_3	9	2	100x100x0.01	3.81E+03	1.11E+02	2.90%
Det_4_4	9	2	100x100x0.01	1.27E+04	2.32E+02	1.82%
Det_5_1	9	2	100x100x0.01	9.42E+03	1.82E+02	1.93%
Det_5_2	9	2	100x100x0.01	1.31E+04	2.77E+02	2.11%
Det_5_3	9	2	100x100x0.01	1.23E+04	2.85E+02	2.32%
Det_5_4	9	2	100x100x0.01	8.75E+03	2.17E+02	2.47%
Det_6_1	9	2	100x100x0.01	7.64E+03	2.06E+02	2.70%
Det_6_2	9	2	100x100x0.01	9.46E+03	1.57E+02	1.66%
Det_6_3	9	2	100x100x0.01	1.20E+04	2.35E+02	1.95%
Det_7_1	9	2	100x100x0.01	8.52E+03	2.45E+02	2.88%
Det_7_2	9	2	100x100x0.01	9.74E+03	2.43E+02	2.50%
Det_8_1	9	2	100x100x0.01	3.49E+04	4.96E+02	1.42%
Det_3_1	9	5	100x100x0.01	1.61E+04	3.16E+02	1.96%
Det_3_2	9	5	100x100x0.01	1.47E+04	3.47E+02	2.36%
Det_3_3	9	5	100x100x0.01	1.23E+04	3.58E+02	2.91%
Det_4_1	9	5	100x100x0.01	8.55E+03	2.60E+02	3.04%
Det_4_2	9	5	100x100x0.01	9.32E+03	1.52E+02	1.63%
Det_4_3	9	5	100x100x0.01	4.23E+03	1.43E+02	3.38%
Det_4_4	9	5	100x100x0.01	1.46E+04	2.99E+02	2.04%
Det_5_1	9	5	100x100x0.01	1.07E+04	2.27E+02	2.12%
Det_5_2	9	5	100x100x0.01	1.45E+04	2.93E+02	2.02%
Det_5_3	9	5	100x100x0.01	1.43E+04	2.81E+02	1.97%
Det_5_4	9	5	100x100x0.01	1.01E+04	2.49E+02	2.47%
Det_6_1	9	5	100x100x0.01	8.64E+03	2.40E+02	2.78%
Det_6_2	9	5	100x100x0.01	1.08E+04	1.94E+02	1.79%
Det_6_3	9	5	100x100x0.01	1.40E+04	2.33E+02	1.67%
Det_7_1	9	5	100x100x0.01	9.56E+03	2.45E+02	2.56%
Det_7_2	9	5	100x100x0.01	1.04E+04	2.13E+02	2.05%
Det_8_1	9	5	100x100x0.01	3.38E+04	4.35E+02	1.29%
Det_3_1	9	9	100x100x0.01	1.59E+04	1.96E+02	1.23%
Det_3_2	9	9	100x100x0.01	1.43E+04	2.20E+02	1.54%
Det_3_3	9	9	100x100x0.01	1.25E+04	2.27E+02	1.82%
Det_4_1	9	9	100x100x0.01	8.59E+03	1.91E+02	2.22%
Det_4_2	9	9	100x100x0.01	9.61E+03	1.17E+02	1.22%
Det_4_3	9	9	100x100x0.01	4.10E+03	9.86E+01	2.41%
Det_4_4	9	9	100x100x0.01	1.45E+04	2.54E+02	1.75%
Det_5_1	9	9	100x100x0.01	1.03E+04	1.16E+02	1.12%
Det_5_2	9	9	100x100x0.01	1.49E+04	2.31E+02	1.55%
Det_5_3	9	9	100x100x0.01	1.37E+04	1.99E+02	1.46%
Det_5_4	9	9	100x100x0.01	1.00E+04	1.70E+02	1.70%
Det_6_1	9	9	100x100x0.01	8.67E+03	1.81E+02	2.09%
Det_6_2	9	9	100x100x0.01	1.08E+04	1.26E+02	1.17%
Det_6_3	9	9	100x100x0.01	1.39E+04	1.77E+02	1.27%
Det_7_1	9	9	100x100x0.01	9.80E+03	2.07E+02	2.11%
Det_7_2	9	9	100x100x0.01	1.07E+04	1.71E+02	1.60%
Det_8_1	9	9	100x100x0.01	3.47E+04	3.38E+02	0.97%

9. Anhang

Tabelle 59: Ergebnisse der GRAS-Simulationen für den Satelliten mit 100 Volumina in verschiedenen Konfigurationen und Van-Allen-Elektronen.

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	1	2	100x100x0.01	1.66E+06	4.37E+04	2.64%
Det_3_2	1	2	100x100x0.01	1.76E+06	4.63E+04	2.63%
Det_3_3	1	2	100x100x0.01	1.08E+06	3.67E+04	3.41%
Det_4_1	1	2	100x100x0.01	6.13E+05	2.75E+04	4.49%
Det_4_2	1	2	100x100x0.01	8.21E+05	2.48E+04	3.02%
Det_4_3	1	2	100x100x0.01	2.07E+05	1.56E+04	7.53%
Det_4_4	1	2	100x100x0.01	1.42E+06	4.03E+04	2.85%
Det_5_1	1	2	100x100x0.01	1.23E+06	3.65E+04	2.96%
Det_5_2	1	2	100x100x0.01	1.72E+06	4.44E+04	2.59%
Det_5_3	1	2	100x100x0.01	1.43E+06	3.79E+04	2.65%
Det_5_4	1	2	100x100x0.01	8.67E+05	3.14E+04	3.62%
Det_6_1	1	2	100x100x0.01	8.79E+05	3.17E+04	3.61%
Det_6_2	1	2	100x100x0.01	1.45E+06	3.98E+04	2.74%
Det_6_3	1	2	100x100x0.01	1.34E+06	3.63E+04	2.70%
Det_7_1	1	2	100x100x0.01	8.41E+05	3.11E+04	3.70%
Det_7_2	1	2	100x100x0.01	1.00E+06	3.11E+04	3.11%
Det_8_1	1	2	100x100x0.01	1.20E+07	1.22E+05	1.02%
Det_3_1	1	5	100x100x0.01	2.68E+06	5.16E+04	1.93%
Det_3_2	1	5	100x100x0.01	3.05E+06	6.09E+04	1.99%
Det_3_3	1	5	100x100x0.01	1.70E+06	4.62E+04	2.72%
Det_4_1	1	5	100x100x0.01	1.12E+06	3.96E+04	3.53%
Det_4_2	1	5	100x100x0.01	1.48E+06	3.47E+04	2.34%
Det_4_3	1	5	100x100x0.01	3.18E+05	1.78E+04	5.60%
Det_4_4	1	5	100x100x0.01	2.49E+06	5.13E+04	2.06%
Det_5_1	1	5	100x100x0.01	2.29E+06	4.88E+04	2.13%
Det_5_2	1	5	100x100x0.01	2.89E+06	5.75E+04	1.99%
Det_5_3	1	5	100x100x0.01	2.47E+06	5.16E+04	2.09%
Det_5_4	1	5	100x100x0.01	1.52E+06	4.37E+04	2.88%
Det_6_1	1	5	100x100x0.01	1.51E+06	4.37E+04	2.88%
Det_6_2	1	5	100x100x0.01	2.51E+06	5.27E+04	2.10%
Det_6_3	1	5	100x100x0.01	2.40E+06	4.96E+04	2.06%
Det_7_1	1	5	100x100x0.01	1.55E+06	4.33E+04	2.79%
Det_7_2	1	5	100x100x0.01	1.86E+06	4.55E+04	2.45%
Det_8_1	1	5	100x100x0.01	1.19E+07	1.20E+05	1.01%
Det_3_1	1	9	100x100x0.01	2.71E+06	5.56E+04	2.06%
Det_3_2	1	9	100x100x0.01	3.00E+06	6.03E+04	2.01%
Det_3_3	1	9	100x100x0.01	1.77E+06	4.88E+04	2.75%
Det_4_1	1	9	100x100x0.01	1.10E+06	4.05E+04	3.68%
Det_4_2	1	9	100x100x0.01	1.47E+06	3.50E+04	2.38%
Det_4_3	1	9	100x100x0.01	3.62E+05	2.10E+04	5.79%
Det_4_4	1	9	100x100x0.01	2.53E+06	5.16E+04	2.04%
Det_5_1	1	9	100x100x0.01	2.29E+06	5.13E+04	2.24%
Det_5_2	1	9	100x100x0.01	2.98E+06	5.71E+04	1.91%
Det_5_3	1	9	100x100x0.01	2.46E+06	5.17E+04	2.10%
Det_5_4	1	9	100x100x0.01	1.49E+06	4.20E+04	2.81%
Det_6_1	1	9	100x100x0.01	1.48E+06	4.25E+04	2.87%
Det_6_2	1	9	100x100x0.01	2.48E+06	5.17E+04	2.08%
Det_6_3	1	9	100x100x0.01	2.37E+06	4.97E+04	2.09%
Det_7_1	1	9	100x100x0.01	1.53E+06	4.39E+04	2.87%
Det_7_2	1	9	100x100x0.01	1.88E+06	4.44E+04	2.36%
Det_8_1	1	9	100x100x0.01	1.19E+07	1.20E+05	1.01%

9. Anhang

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	3	2	100x100x0.01	1.60E+06	4.25E+04	2.66%
Det_3_2	3	2	100x100x0.01	1.75E+06	4.53E+04	2.59%
Det_3_3	3	2	100x100x0.01	1.05E+06	3.69E+04	3.50%
Det_4_1	3	2	100x100x0.01	5.88E+05	2.64E+04	4.49%
Det_4_2	3	2	100x100x0.01	7.92E+05	2.35E+04	2.97%
Det_4_3	3	2	100x100x0.01	1.91E+05	1.47E+04	7.70%
Det_4_4	3	2	100x100x0.01	1.45E+06	4.06E+04	2.80%
Det_5_1	3	2	100x100x0.01	1.26E+06	3.52E+04	2.79%
Det_5_2	3	2	100x100x0.01	1.68E+06	4.31E+04	2.57%
Det_5_3	3	2	100x100x0.01	1.39E+06	3.84E+04	2.77%
Det_5_4	3	2	100x100x0.01	8.15E+05	2.94E+04	3.61%
Det_6_1	3	2	100x100x0.01	9.10E+05	3.46E+04	3.80%
Det_6_2	3	2	100x100x0.01	1.43E+06	4.12E+04	2.88%
Det_6_3	3	2	100x100x0.01	1.36E+06	3.85E+04	2.83%
Det_7_1	3	2	100x100x0.01	8.36E+05	3.04E+04	3.64%
Det_7_2	3	2	100x100x0.01	9.48E+05	3.07E+04	3.24%
Det_8_1	3	2	100x100x0.01	1.20E+07	1.21E+05	1.01%
Det_3_1	3	5	100x100x0.01	2.63E+06	5.32E+04	2.03%
Det_3_2	3	5	100x100x0.01	3.02E+06	6.14E+04	2.03%
Det_3_3	3	5	100x100x0.01	1.70E+06	4.89E+04	2.87%
Det_4_1	3	5	100x100x0.01	1.07E+06	3.83E+04	3.57%
Det_4_2	3	5	100x100x0.01	1.46E+06	3.56E+04	2.43%
Det_4_3	3	5	100x100x0.01	3.34E+05	2.13E+04	6.39%
Det_4_4	3	5	100x100x0.01	2.39E+06	5.11E+04	2.14%
Det_5_1	3	5	100x100x0.01	2.35E+06	5.11E+04	2.18%
Det_5_2	3	5	100x100x0.01	2.95E+06	5.76E+04	1.95%
Det_5_3	3	5	100x100x0.01	2.50E+06	5.29E+04	2.11%
Det_5_4	3	5	100x100x0.01	1.47E+06	4.30E+04	2.93%
Det_6_1	3	5	100x100x0.01	1.51E+06	4.34E+04	2.88%
Det_6_2	3	5	100x100x0.01	2.55E+06	5.33E+04	2.09%
Det_6_3	3	5	100x100x0.01	2.45E+06	5.40E+04	2.21%
Det_7_1	3	5	100x100x0.01	1.57E+06	4.52E+04	2.88%
Det_7_2	3	5	100x100x0.01	1.84E+06	4.28E+04	2.33%
Det_8_1	3	5	100x100x0.01	1.17E+07	1.17E+05	1.00%
Det_3_1	3	9	100x100x0.01	2.68E+06	5.54E+04	2.07%
Det_3_2	3	9	100x100x0.01	2.94E+06	5.80E+04	1.97%
Det_3_3	3	9	100x100x0.01	1.75E+06	4.98E+04	2.84%
Det_4_1	3	9	100x100x0.01	1.05E+06	3.65E+04	3.48%
Det_4_2	3	9	100x100x0.01	1.40E+06	3.27E+04	2.34%
Det_4_3	3	9	100x100x0.01	3.08E+05	1.92E+04	6.24%
Det_4_4	3	9	100x100x0.01	2.32E+06	4.82E+04	2.08%
Det_5_1	3	9	100x100x0.01	2.15E+06	4.64E+04	2.15%
Det_5_2	3	9	100x100x0.01	3.02E+06	6.03E+04	2.00%
Det_5_3	3	9	100x100x0.01	2.44E+06	5.17E+04	2.12%
Det_5_4	3	9	100x100x0.01	1.51E+06	4.34E+04	2.87%
Det_6_1	3	9	100x100x0.01	1.54E+06	4.44E+04	2.88%
Det_6_2	3	9	100x100x0.01	2.49E+06	5.23E+04	2.10%
Det_6_3	3	9	100x100x0.01	2.41E+06	5.01E+04	2.08%
Det_7_1	3	9	100x100x0.01	1.53E+06	4.40E+04	2.88%
Det_7_2	3	9	100x100x0.01	1.76E+06	4.19E+04	2.38%
Det_8_1	3	9	100x100x0.01	1.19E+07	1.20E+05	1.01%

9. Anhang

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	9	2	100x100x0.01	1.55E+06	4.14E+04	2.68%
Det_3_2	9	2	100x100x0.01	1.71E+06	4.47E+04	2.62%
Det_3_3	9	2	100x100x0.01	9.45E+05	3.27E+04	3.46%
Det_4_1	9	2	100x100x0.01	5.88E+05	2.70E+04	4.59%
Det_4_2	9	2	100x100x0.01	7.92E+05	2.42E+04	3.06%
Det_4_3	9	2	100x100x0.01	2.09E+05	1.42E+04	6.81%
Det_4_4	9	2	100x100x0.01	1.45E+06	4.08E+04	2.81%
Det_5_1	9	2	100x100x0.01	1.23E+06	3.44E+04	2.79%
Det_5_2	9	2	100x100x0.01	1.75E+06	4.62E+04	2.63%
Det_5_3	9	2	100x100x0.01	1.45E+06	4.22E+04	2.91%
Det_5_4	9	2	100x100x0.01	8.84E+05	3.06E+04	3.46%
Det_6_1	9	2	100x100x0.01	7.66E+05	2.78E+04	3.63%
Det_6_2	9	2	100x100x0.01	1.38E+06	3.78E+04	2.73%
Det_6_3	9	2	100x100x0.01	1.38E+06	4.05E+04	2.92%
Det_7_1	9	2	100x100x0.01	9.04E+05	3.39E+04	3.75%
Det_7_2	9	2	100x100x0.01	9.36E+05	2.72E+04	2.90%
Det_8_1	9	2	100x100x0.01	1.15E+07	1.19E+05	1.03%
Det_3_1	9	5	100x100x0.01	2.61E+06	5.30E+04	2.03%
Det_3_2	9	5	100x100x0.01	2.96E+06	5.64E+04	1.90%
Det_3_3	9	5	100x100x0.01	1.61E+06	4.41E+04	2.74%
Det_4_1	9	5	100x100x0.01	1.07E+06	3.82E+04	3.57%
Det_4_2	9	5	100x100x0.01	1.47E+06	3.57E+04	2.42%
Det_4_3	9	5	100x100x0.01	3.21E+05	1.78E+04	5.56%
Det_4_4	9	5	100x100x0.01	2.45E+06	5.07E+04	2.07%
Det_5_1	9	5	100x100x0.01	2.25E+06	5.08E+04	2.26%
Det_5_2	9	5	100x100x0.01	2.86E+06	5.60E+04	1.96%
Det_5_3	9	5	100x100x0.01	2.52E+06	5.28E+04	2.10%
Det_5_4	9	5	100x100x0.01	1.57E+06	4.44E+04	2.82%
Det_6_1	9	5	100x100x0.01	1.55E+06	4.36E+04	2.82%
Det_6_2	9	5	100x100x0.01	2.54E+06	5.34E+04	2.10%
Det_6_3	9	5	100x100x0.01	2.35E+06	4.86E+04	2.06%
Det_7_1	9	5	100x100x0.01	1.66E+06	4.69E+04	2.82%
Det_7_2	9	5	100x100x0.01	1.84E+06	4.40E+04	2.39%
Det_8_1	9	5	100x100x0.01	1.14E+07	1.17E+05	1.02%
Det_3_1	9	9	100x100x0.01	2.57E+06	5.17E+04	2.01%
Det_3_2	9	9	100x100x0.01	2.99E+06	6.16E+04	2.06%
Det_3_3	9	9	100x100x0.01	1.68E+06	4.56E+04	2.71%
Det_4_1	9	9	100x100x0.01	1.11E+06	4.07E+04	3.67%
Det_4_2	9	9	100x100x0.01	1.37E+06	3.27E+04	2.39%
Det_4_3	9	9	100x100x0.01	3.35E+05	1.83E+04	5.47%
Det_4_4	9	9	100x100x0.01	2.54E+06	5.50E+04	2.17%
Det_5_1	9	9	100x100x0.01	2.26E+06	4.95E+04	2.19%
Det_5_2	9	9	100x100x0.01	2.88E+06	5.71E+04	1.98%
Det_5_3	9	9	100x100x0.01	2.55E+06	5.43E+04	2.13%
Det_5_4	9	9	100x100x0.01	1.51E+06	4.24E+04	2.80%
Det_6_1	9	9	100x100x0.01	1.51E+06	4.49E+04	2.97%
Det_6_2	9	9	100x100x0.01	2.47E+06	5.27E+04	2.14%
Det_6_3	9	9	100x100x0.01	2.43E+06	5.12E+04	2.11%
Det_7_1	9	9	100x100x0.01	1.58E+06	4.38E+04	2.76%
Det_7_2	9	9	100x100x0.01	1.75E+06	3.95E+04	2.26%
Det_8_1	9	9	100x100x0.01	1.14E+07	1.18E+05	1.03%

9. Anhang

Tabelle 60: Ergebnisse der GRAS-Simulationen für den Satelliten mit maximaler Komplexität und solare Protonen.

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
1	3_2_O	80x80x1	4.31E+03	9.34E+01	2.17%
	3_2_U	80x80x1	4.26E+03	9.18E+01	2.15%
	4_1_OH	80x80x1	2.33E+02	2.90E+01	12.49%
	4_1_OV	80x80x1	3.90E+02	3.79E+01	9.72%
	4_2_1_VO	80x80x1	3.10E+03	7.14E+01	2.30%
	4_2_1_VU	80x80x1	3.01E+03	6.79E+01	2.26%
	4_2_2_VO	80x80x1	1.80E+03	5.24E+01	2.91%
	4_2_2_VU	80x80x1	1.79E+03	5.45E+01	3.04%
	4_2_2_HO	80x80x1	1.59E+03	4.88E+01	3.08%
	4_2_2_HU	80x80x1	2.11E+03	5.58E+01	2.64%
	4_3_2_V	80x80x1	1.57E+03	5.00E+01	3.19%
	4_3_2_H	80x80x1	1.72E+03	5.32E+01	3.09%
	5_1_V	80x80x1	4.04E+03	8.46E+01	2.09%
	5_1_H	80x80x1	4.51E+03	9.15E+01	2.03%
	5_3_VO	80x80x1	3.67E+03	8.15E+01	2.22%
	5_3_VM	80x80x1	3.47E+03	7.89E+01	2.27%
	5_3_VU	80x80x1	3.43E+03	7.96E+01	2.32%
	5_3_HO	80x80x1	3.86E+03	8.29E+01	2.15%
	5_3_HM	80x80x1	3.82E+03	8.30E+01	2.17%
	5_3_HU	80x80x1	3.88E+03	8.47E+01	2.19%
8_4_1_V	80x80x1	1.63E+03	5.87E+01	3.60%	
8_4_1_H	80x80x1	1.41E+03	5.10E+01	3.61%	
2	3_2_O	30x30x1	5.71E+03	2.87E+02	5.03%
	3_2_U	30x30x1	7.15E+03	3.13E+02	4.38%
	4_1_OH	30x30x1	3.52E+02	7.95E+01	22.60%
	4_1_OV	30x30x1	1.04E+03	1.53E+02	14.65%
	4_2_1_VO	30x30x1	5.02E+03	2.51E+02	5.00%
	4_2_1_VU	30x30x1	6.58E+03	3.08E+02	4.69%
	4_2_2_VO	30x30x1	1.86E+03	1.44E+02	8.01%
	4_2_2_VU	30x30x1	3.48E+03	2.06E+02	5.93%
	4_2_2_HO	30x30x1	2.06E+03	1.65E+02	8.01%
	4_2_2_HU	30x30x1	1.81E+03	1.42E+02	7.84%
	4_3_2_V	30x30x1	2.17E+03	1.68E+02	7.77%
	4_3_2_H	30x30x1	1.60E+03	1.37E+02	8.53%
	5_1_V	30x30x1	7.53E+03	3.29E+02	4.37%
	5_1_H	30x30x1	5.05E+03	2.80E+02	5.54%
	5_3_VO	30x30x1	6.74E+03	3.05E+02	4.52%
	5_3_VM	30x30x1	5.99E+03	2.83E+02	4.73%
	5_3_VU	30x30x1	6.28E+03	3.03E+02	4.82%
	5_3_HO	30x30x1	4.43E+03	2.56E+02	5.79%
	5_3_HM	30x30x1	4.45E+03	2.64E+02	5.93%
	5_3_HU	30x30x1	4.03E+03	2.35E+02	5.83%
8_4_1_V	30x30x1	2.14E+03	1.92E+02	8.96%	
8_4_1_H	30x30x1	2.27E+03	1.87E+02	8.24%	

9. Anhang

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
3	3_2_O	80x10x5	2.82E+03	1.40E+02	4.96%
	3_2_U	80x10x5	6.06E+03	1.99E+02	3.28%
	4_1_OH	80x10x5	3.86E+02	5.53E+01	14.34%
	4_1_OV	80x10x5	5.60E+02	7.06E+01	12.60%
	4_2_1_VO	80x10x5	4.38E+03	1.67E+02	3.80%
	4_2_1_VU	80x10x5	4.34E+03	1.63E+02	3.77%
	4_2_2_VO	80x10x5	2.26E+03	1.19E+02	5.25%
	4_2_2_VU	80x10x5	2.31E+03	1.19E+02	5.17%
	4_2_2_HO	80x10x5	1.18E+03	8.38E+01	7.09%
	4_2_2_HU	80x10x5	1.48E+03	9.41E+01	6.36%
	4_3_2_V	80x10x5	1.67E+03	1.01E+02	6.01%
	4_3_2_H	80x10x5	1.57E+03	1.04E+02	6.61%
	5_1_V	80x10x5	5.82E+03	1.96E+02	3.37%
	5_1_H	80x10x5	3.85E+03	1.62E+02	4.21%
	5_3_VO	80x10x5	5.07E+03	1.82E+02	3.59%
	5_3_VM	80x10x5	5.50E+03	1.94E+02	3.52%
	5_3_VU	80x10x5	5.72E+03	1.98E+02	3.46%
	5_3_HO	80x10x5	3.07E+03	1.43E+02	4.65%
	5_3_HM	80x10x5	3.18E+03	1.48E+02	4.66%
	5_3_HU	80x10x5	2.97E+03	1.41E+02	4.73%
8_4_1_V	80x10x5	1.89E+03	1.16E+02	6.13%	
8_4_1_H	80x10x5	1.48E+03	1.06E+02	7.15%	
4	3_2_O	80x10x1	6.16E+03	3.10E+02	5.04%
	3_2_U	80x10x1	8.77E+03	3.60E+02	4.11%
	4_1_OH	80x10x1	5.29E+02	1.21E+02	22.92%
	4_1_OV	80x10x1	1.78E+03	2.22E+02	12.45%
	4_2_1_VO	80x10x1	6.26E+03	2.88E+02	4.59%
	4_2_1_VU	80x10x1	7.65E+03	3.11E+02	4.07%
	4_2_2_VO	80x10x1	2.73E+03	1.89E+02	6.90%
	4_2_2_VU	80x10x1	3.90E+03	2.10E+02	5.39%
	4_2_2_HO	80x10x1	1.52E+03	1.31E+02	8.57%
	4_2_2_HU	80x10x1	1.37E+03	1.23E+02	8.94%
	4_3_2_V	80x10x1	3.13E+03	2.14E+02	6.84%
	4_3_2_H	80x10x1	1.48E+03	1.34E+02	9.10%
	5_1_V	80x10x1	9.37E+03	3.80E+02	4.05%
	5_1_H	80x10x1	3.40E+03	2.16E+02	6.35%
	5_3_VO	80x10x1	8.13E+03	3.46E+02	4.26%
	5_3_VM	80x10x1	8.53E+03	3.56E+02	4.17%
	5_3_VU	80x10x1	7.77E+03	3.20E+02	4.12%
	5_3_HO	80x10x1	3.16E+03	2.10E+02	6.65%
	5_3_HM	80x10x1	2.89E+03	2.00E+02	6.93%
	5_3_HU	80x10x1	2.92E+03	2.04E+02	7.00%
8_4_1_V	80x10x1	2.88E+03	2.17E+02	7.52%	
8_4_1_H	80x10x1	2.27E+03	1.97E+02	8.69%	

9. Anhang

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Dosimeter	D_01	200x80x0.1	9.62E+04	4.79E+02	0.50%
	D_02	200x80x0.1	9.35E+04	4.40E+02	0.47%
	D_03	200x80x0.1	7.30E+04	3.64E+02	0.50%
	D_04	200x80x0.1	5.50E+04	3.12E+02	0.57%
	D_05	200x80x0.1	4.42E+04	2.71E+02	0.61%
	D_06	200x80x0.1	3.67E+04	2.41E+02	0.65%
	D_07	200x80x0.1	3.16E+04	2.19E+02	0.69%
	D_08	200x80x0.1	2.78E+04	2.04E+02	0.73%
	D_09	200x80x0.1	2.46E+04	1.88E+02	0.76%
	D_10	200x80x0.1	2.20E+04	1.75E+02	0.80%
	D_11	200x80x0.5	1.70E+04	1.25E+02	0.74%
	D_12	200x80x0.5	1.19E+04	1.02E+02	0.85%
	D_13	200x80x0.5	9.30E+03	8.88E+01	0.95%
	D_14	200x80x0.5	7.42E+03	7.81E+01	1.05%
	D_15	200x80x0.5	6.15E+03	7.06E+01	1.15%
	D_16	200x80x0.5	5.20E+03	6.38E+01	1.23%
	D_17	200x80x0.5	4.43E+03	5.79E+01	1.31%
	D_18	200x80x0.5	3.93E+03	5.41E+01	1.38%

9. Anhang

Tabelle 61: Ergebnisse der GRAS-Simulationen für den Satelliten mit maximaler Komplexität und Van-Allen-Elektronen.

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
1	3_2_O	80x80x1	2.25E+05	1.07E+04	4.75%
	3_2_U	80x80x1	3.55E+04	3.38E+03	9.53%
	4_1_OH	80x80x1	1.41E+03	2.06E+02	14.60%
	4_1_OV	80x80x1	7.89E+03	1.12E+03	14.21%
	4_2_1_VO	80x80x1	1.48E+04	1.80E+03	12.14%
	4_2_1_VU	80x80x1	1.33E+04	1.53E+03	11.47%
	4_2_2_VO	80x80x1	5.38E+03	7.48E+02	13.89%
	4_2_2_VU	80x80x1	8.32E+03	1.15E+03	13.81%
	4_2_2_HO	80x80x1	3.33E+04	3.46E+03	10.39%
	4_2_2_HU	80x80x1	3.86E+04	3.52E+03	9.12%
	4_3_2_V	80x80x1	9.06E+03	1.18E+03	13.07%
	4_3_2_H	80x80x1	1.12E+04	1.34E+03	11.96%
	5_1_V	80x80x1	2.70E+04	2.77E+03	10.25%
	5_1_H	80x80x1	2.13E+05	9.97E+03	4.69%
	5_3_VO	80x80x1	1.89E+04	2.18E+03	11.57%
	5_3_VM	80x80x1	1.93E+04	2.20E+03	11.41%
	5_3_VU	80x80x1	1.86E+04	2.03E+03	10.94%
	5_3_HO	80x80x1	1.94E+05	9.87E+03	5.08%
	5_3_HM	80x80x1	1.86E+05	9.33E+03	5.02%
	5_3_HU	80x80x1	1.85E+05	9.47E+03	5.12%
8_4_1_V	80x80x1	1.19E+04	1.57E+03	13.21%	
8_4_1_H	80x80x1	7.95E+03	9.14E+02	11.50%	
2	3_2_O	30x30x1	4.20E+05	3.44E+04	8.19%
	3_2_U	30x30x1	8.12E+05	5.45E+04	6.71%
	4_1_OH	30x30x1	6.38E+03	1.05E+03	16.38%
	4_1_OV	30x30x1	5.34E+04	7.95E+03	14.89%
	4_2_1_VO	30x30x1	5.07E+05	3.95E+04	7.80%
	4_2_1_VU	30x30x1	7.96E+05	5.46E+04	6.87%
	4_2_2_VO	30x30x1	1.10E+05	1.58E+04	14.36%
	4_2_2_VU	30x30x1	1.85E+05	2.03E+04	10.98%
	4_2_2_HO	30x30x1	7.15E+04	1.09E+04	15.19%
	4_2_2_HU	30x30x1	1.08E+05	1.58E+04	14.64%
	4_3_2_V	30x30x1	5.28E+04	6.86E+03	12.99%
	4_3_2_H	30x30x1	2.45E+04	3.33E+03	13.63%
	5_1_V	30x30x1	7.16E+05	5.02E+04	7.01%
	5_1_H	30x30x1	3.64E+05	3.34E+04	9.15%
	5_3_VO	30x30x1	8.21E+05	5.34E+04	6.51%
	5_3_VM	30x30x1	7.49E+05	5.08E+04	6.78%
	5_3_VU	30x30x1	7.00E+05	4.76E+04	6.79%
	5_3_HO	30x30x1	3.13E+05	2.98E+04	9.50%
	5_3_HM	30x30x1	2.70E+05	2.71E+04	10.05%
	5_3_HU	30x30x1	3.07E+05	2.94E+04	9.58%
8_4_1_V	30x30x1	4.74E+04	6.62E+03	13.97%	
8_4_1_H	30x30x1	6.46E+04	8.33E+03	12.90%	

9. Anhang

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
3	3_2_O	80x10x5	1.03E+05	8.69E+03	8.42%
	3_2_U	80x10x5	5.16E+05	2.28E+04	4.42%
	4_1_OH	80x10x5	7.08E+03	1.06E+03	15.04%
	4_1_OV	80x10x5	2.96E+04	3.90E+03	13.15%
	4_2_1_VO	80x10x5	4.19E+05	2.08E+04	4.97%
	4_2_1_VU	80x10x5	4.19E+05	2.09E+04	5.00%
	4_2_2_VO	80x10x5	9.08E+04	7.96E+03	8.76%
	4_2_2_VU	80x10x5	6.11E+04	5.93E+03	9.72%
	4_2_2_HO	80x10x5	2.73E+04	3.44E+03	12.61%
	4_2_2_HU	80x10x5	2.61E+04	2.98E+03	11.42%
	4_3_2_V	80x10x5	3.90E+04	4.81E+03	12.34%
	4_3_2_H	80x10x5	2.41E+04	2.98E+03	12.38%
	5_1_V	80x10x5	5.40E+05	2.39E+04	4.42%
	5_1_H	80x10x5	1.53E+05	1.10E+04	7.21%
	5_3_VO	80x10x5	4.56E+05	2.11E+04	4.63%
	5_3_VM	80x10x5	4.72E+05	2.10E+04	4.44%
	5_3_VU	80x10x5	4.85E+05	2.22E+04	4.57%
	5_3_HO	80x10x5	1.15E+05	8.98E+03	7.79%
	5_3_HM	80x10x5	1.06E+05	8.44E+03	7.97%
	5_3_HU	80x10x5	9.84E+04	8.19E+03	8.32%
8_4_1_V	80x10x5	4.36E+04	4.75E+03	10.89%	
8_4_1_H	80x10x5	2.76E+04	3.36E+03	12.14%	
4	3_2_O	80x10x1	4.01E+05	3.34E+04	8.33%
	3_2_U	80x10x1	1.41E+06	7.21E+04	5.12%
	4_1_OH	80x10x1	2.50E+04	3.76E+03	15.02%
	4_1_OV	80x10x1	1.47E+05	1.86E+04	12.59%
	4_2_1_VO	80x10x1	1.04E+06	6.07E+04	5.83%
	4_2_1_VU	80x10x1	1.21E+06	6.74E+04	5.58%
	4_2_2_VO	80x10x1	2.30E+05	2.43E+04	10.57%
	4_2_2_VU	80x10x1	3.15E+05	3.00E+04	9.54%
	4_2_2_HO	80x10x1	3.20E+04	4.82E+03	15.08%
	4_2_2_HU	80x10x1	6.19E+04	8.77E+03	14.17%
	4_3_2_V	80x10x1	6.35E+04	9.41E+03	14.83%
	4_3_2_H	80x10x1	9.61E+04	1.33E+04	13.89%
	5_1_V	80x10x1	1.43E+06	7.08E+04	4.94%
	5_1_H	80x10x1	1.77E+05	2.14E+04	12.09%
	5_3_VO	80x10x1	1.28E+06	6.75E+04	5.29%
	5_3_VM	80x10x1	1.40E+06	7.31E+04	5.21%
	5_3_VU	80x10x1	1.14E+06	6.39E+04	5.63%
	5_3_HO	80x10x1	9.60E+04	1.32E+04	13.73%
	5_3_HM	80x10x1	9.29E+04	1.15E+04	12.43%
	5_3_HU	80x10x1	1.64E+05	1.99E+04	12.17%
8_4_1_V	80x10x1	1.83E+05	2.16E+04	11.81%	
8_4_1_H	80x10x1	1.12E+05	1.43E+04	12.83%	

9. Anhang

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Dosimeter	D_01	200x80x0.1	8.58E+08	3.46E+06	0.40%
	D_02	200x80x0.1	1.38E+08	1.52E+06	1.10%
	D_03	200x80x0.1	6.31E+07	1.07E+06	1.70%
	D_04	200x80x0.1	4.22E+07	9.04E+05	2.14%
	D_05	200x80x0.1	2.97E+07	7.39E+05	2.49%
	D_06	200x80x0.1	2.34E+07	6.80E+05	2.90%
	D_07	200x80x0.1	1.92E+07	6.13E+05	3.20%
	D_08	200x80x0.1	1.53E+07	5.37E+05	3.51%
	D_09	200x80x0.1	1.30E+07	4.95E+05	3.82%
	D_10	200x80x0.1	1.04E+07	4.42E+05	4.25%
	D_11	200x80x0.5	6.69E+06	2.68E+05	4.00%
	D_12	200x80x0.5	3.20E+06	1.32E+05	4.14%
	D_13	200x80x0.5	1.49E+06	6.37E+04	4.28%
	D_14	200x80x0.5	7.44E+05	3.15E+04	4.24%
	D_15	200x80x0.5	3.85E+05	1.58E+04	4.11%
	D_16	200x80x0.5	1.87E+05	7.15E+03	3.82%
	D_17	200x80x0.5	9.93E+04	5.16E+03	5.20%
	D_18	200x80x0.5	4.58E+04	2.97E+03	6.49%

C 3. Ergebnisse der SSAT-Simulationen in Verbindung mit SHIELDOSE

Tabelle 62: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit SHIELDOSE für einfache geometrische Körper und solare Protonen.

Form	Dicke [mm Al eq.]	Größe [mm]	Material	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Kugel	1	10	Al	1x1x0.01	7.29E+04	1.88E+02	0.26%
	2	10	Al	1x1x0.01	3.79E+04	9.11E+01	0.24%
	1	100	Al	10x10x0.01	7.27E+04	1.95E+02	0.27%
	5	100	Al	10x10x0.01	1.38E+04	3.25E+01	0.24%
	10	100	Al	10x10x0.01	5.94E+03	1.36E+01	0.23%
	1	10	Pb	1x1x0.01	7.28E+04	1.88E+02	0.26%
	2	10	Pb	1x1x0.01	3.79E+04	9.11E+01	0.24%
	1	100	Pb	10x10x0.01	7.27E+04	1.95E+02	0.27%
	5	100	Pb	10x10x0.01	1.38E+04	3.25E+01	0.24%
	10	100	Pb	10x10x0.01	5.94E+03	1.36E+01	0.23%
Box	1	10	Al	1x1x0.01	6.50E+04	2.32E+02	0.36%
	2	10	Al	1x1x0.01	3.21E+04	1.12E+02	0.35%
	1	100	Al	10x10x0.01	6.49E+04	2.39E+02	0.37%
	5	100	Al	10x10x0.01	1.13E+04	3.95E+01	0.35%
	10	100	Al	10x10x0.01	4.70E+03	1.63E+01	0.35%
	1	10	Pb	1x1x0.01	6.50E+04	2.32E+02	0.36%
	2	10	Pb	1x1x0.01	3.21E+04	1.12E+02	0.35%
	1	100	Pb	10x10x0.01	6.48E+04	2.39E+02	0.37%
	5	100	Pb	10x10x0.01	1.12E+04	3.95E+01	0.35%
	10	100	Pb	10x10x0.01	4.70E+03	1.63E+01	0.35%
Zylinder	1	10	Al	1x1x0.01	6.82E+04	2.15E+02	0.32%
	2	10	Al	1x1x0.01	3.44E+04	1.04E+02	0.30%
	1	100	Al	10x10x0.01	6.80E+04	2.24E+02	0.33%
	5	100	Al	10x10x0.01	1.22E+04	3.76E+01	0.31%
	10	100	Al	10x10x0.01	5.17E+03	1.56E+01	0.30%
	1	10	Pb	1x1x0.01	6.81E+04	2.15E+02	0.32%
	2	10	Pb	1x1x0.01	3.44E+04	1.04E+02	0.30%
	1	100	Pb	10x10x0.01	6.80E+04	2.24E+02	0.33%
	5	100	Pb	10x10x0.01	1.22E+04	3.75E+01	0.31%
	10	100	Pb	10x10x0.01	5.16E+03	1.56E+01	0.30%

9. Anhang

Tabelle 63: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit SHIELDOSE für einfache geometrische Körper und Van-Allen-Elektronen.

Form	Dicke [mm Al eq.]	Größe [mm]	Material	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Kugel	1	10	Al	1x1x0.01	1.24E+08	3.15E+05	0.25%
	2	10	Al	1x1x0.01	3.63E+07	8.56E+04	0.24%
	1	100	Al	10x10x0.01	1.24E+08	3.17E+05	0.26%
	5	100	Al	10x10x0.01	6.99E+05	1.56E+03	0.22%
	10	100	Al	10x10x0.01	4.86E+04	1.12E+02	0.23%
	1	10	Pb	1x1x0.01	1.24E+08	3.15E+05	0.25%
	2	10	Pb	1x1x0.01	3.62E+07	8.55E+04	0.24%
	1	100	Pb	10x10x0.01	1.24E+08	3.17E+05	0.26%
	5	100	Pb	10x10x0.01	6.96E+05	1.55E+03	0.22%
	10	100	Pb	10x10x0.01	4.85E+04	1.12E+02	0.23%
Box	1	10	Al	1x1x0.01	1.04E+08	3.67E+05	0.35%
	2	10	Al	1x1x0.01	2.49E+07	8.44E+04	0.34%
	1	100	Al	10x10x0.01	1.04E+08	3.70E+05	0.36%
	5	100	Al	10x10x0.01	3.02E+05	1.02E+03	0.34%
	10	100	Al	10x10x0.01	4.21E+04	1.47E+02	0.35%
	1	10	Pb	1x1x0.01	1.04E+08	3.67E+05	0.35%
	2	10	Pb	1x1x0.01	2.49E+07	8.43E+04	0.34%
	1	100	Pb	10x10x0.01	1.04E+08	3.70E+05	0.36%
	5	100	Pb	10x10x0.01	3.01E+05	1.02E+03	0.34%
	10	100	Pb	10x10x0.01	4.21E+04	1.47E+02	0.35%
Zylinder	1	10	Al	1x1x0.01	1.12E+08	3.52E+05	0.31%
	2	10	Al	1x1x0.01	2.94E+07	8.83E+04	0.30%
	1	100	Al	10x10x0.01	1.12E+08	3.56E+05	0.32%
	5	100	Al	10x10x0.01	4.26E+05	1.27E+03	0.30%
	10	100	Al	10x10x0.01	4.45E+04	1.35E+02	0.30%
	1	10	Pb	1x1x0.01	1.12E+08	3.52E+05	0.31%
	2	10	Pb	1x1x0.01	2.94E+07	8.82E+04	0.30%
	1	100	Pb	10x10x0.01	1.12E+08	3.56E+05	0.32%
	5	100	Pb	10x10x0.01	4.24E+05	1.26E+03	0.30%
	10	100	Pb	10x10x0.01	4.45E+04	1.35E+02	0.30%

9. Anhang

Tabelle 64: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit SHIELDDOSE für den Satelliten mit 10 Volumina in verschiedenen Konfigurationen und solare Protonen. Die Positionsangaben des Targets beziehen sich auf ein Koordinatensystem mit Ursprung in der Mitte des Satelliten.

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
0/0/0	1	1	80x150x0.01	7.92E+03	6.51E+01	0.82%
	1	3	80x150x0.01	8.93E+03	7.85E+01	0.88%
	1	5	80x150x0.01	1.01E+04	8.19E+01	0.81%
	3	1	80x150x0.01	9.02E+03	7.10E+01	0.79%
	3	3	80x150x0.01	1.02E+04	8.62E+01	0.84%
	3	5	80x150x0.01	1.17E+04	9.09E+01	0.78%
	5	1	80x150x0.01	9.50E+03	7.19E+01	0.76%
	5	3	80x150x0.01	1.08E+04	8.71E+01	0.81%
	5	5	80x150x0.01	1.24E+04	9.20E+01	0.74%
1/0/0	1	1	10.01x100x100	2.91E+04	2.04E+02	0.70%
	1	3	10.01x100x100	3.72E+04	2.55E+02	0.69%
	1	5	10.01x100x100	4.99E+04	3.70E+02	0.74%
	3	1	10.01x100x100	2.96E+04	2.06E+02	0.69%
	3	3	10.01x100x100	3.79E+04	2.57E+02	0.68%
	3	5	10.01x100x100	5.08E+04	3.73E+02	0.73%
	5	1	10.01x100x100	3.00E+04	2.07E+02	0.69%
	5	3	10.01x100x100	3.83E+04	2.58E+02	0.67%
	5	5	10.01x100x100	5.14E+04	3.75E+02	0.73%
0/1/0	1	1	100x0.01x100	1.75E+04	1.41E+02	0.80%
	1	3	100x0.01x100	2.16E+04	1.68E+02	0.78%
	1	5	100x0.01x100	2.86E+04	2.45E+02	0.85%
	3	1	100x0.01x100	1.91E+04	1.50E+02	0.79%
	3	3	100x0.01x100	2.37E+04	1.80E+02	0.76%
	3	5	100x0.01x100	3.14E+04	2.58E+02	0.82%
	5	1	100x0.01x100	1.98E+04	1.52E+02	0.77%
	5	3	100x0.01x100	2.45E+04	1.82E+02	0.74%
	5	5	100x0.01x100	3.25E+04	2.61E+02	0.80%
1/1/1	1	1	100x100x0.01	4.25E+04	2.40E+02	0.56%
	1	3	100x100x0.01	5.40E+04	2.97E+02	0.55%
	1	5	100x100x0.01	7.28E+04	4.28E+02	0.59%
	3	1	100x100x0.01	4.26E+04	2.40E+02	0.56%
	3	3	100x100x0.01	5.41E+04	2.97E+02	0.55%
	3	5	100x100x0.01	7.29E+04	4.29E+02	0.59%
	5	1	100x100x0.01	4.11E+04	2.33E+02	0.57%
	5	3	100x100x0.01	5.20E+04	2.88E+02	0.55%
	5	5	100x100x0.01	7.02E+04	4.18E+02	0.60%

9. Anhang

Tabelle 65: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit SHIELDDOSE für den Satelliten mit 10 Volumina in verschiedenen Konfigurationen und Van-Allen-Elektronen. Die Positionsangaben des Targets beziehen sich auf ein Koordinatensystem mit Ursprung in der Mitte des Satelliten.

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
0/0/0	1	1	80x150x0.01	4.45E+06	3.91E+04	0.88%
	1	3	80x150x0.01	6.29E+06	6.24E+04	0.99%
	1	5	80x150x0.01	8.92E+06	7.57E+04	0.85%
	3	1	80x150x0.01	5.74E+06	4.41E+04	0.77%
	3	3	80x150x0.01	8.07E+06	6.97E+04	0.86%
	3	5	80x150x0.01	1.15E+07	8.52E+04	0.74%
	5	1	80x150x0.01	5.98E+06	4.49E+04	0.75%
	5	3	80x150x0.01	8.60E+06	7.15E+04	0.83%
	5	5	80x150x0.01	1.23E+07	8.75E+04	0.71%
1/0/0	1	1	0.01x100x100	3.94E+07	2.50E+05	0.64%
	1	3	0.01x100x100	5.71E+07	3.57E+05	0.63%
	1	5	0.01x100x100	8.52E+07	5.96E+05	0.70%
	3	1	0.01x100x100	4.02E+07	2.52E+05	0.63%
	3	3	0.01x100x100	5.82E+07	3.60E+05	0.62%
	3	5	0.01x100x100	8.67E+07	6.00E+05	0.69%
	5	1	0.01x100x100	4.07E+07	2.54E+05	0.62%
	5	3	0.01x100x100	5.90E+07	3.63E+05	0.62%
	5	5	0.01x100x100	8.78E+07	6.04E+05	0.69%
0/1/0	1	1	100x0.01x100	2.62E+07	1.96E+05	0.75%
	1	3	100x0.01x100	3.56E+07	2.58E+05	0.72%
	1	5	100x0.01x100	5.08E+07	4.15E+05	0.82%
	3	1	100x0.01x100	2.87E+07	2.08E+05	0.72%
	3	3	100x0.01x100	3.94E+07	2.79E+05	0.71%
	3	5	100x0.01x100	5.63E+07	4.42E+05	0.79%
	5	1	100x0.01x100	2.97E+07	2.10E+05	0.71%
	5	3	100x0.01x100	4.08E+07	2.82E+05	0.69%
	5	5	100x0.01x100	5.82E+07	4.46E+05	0.77%
1/1/1	1	1	100x100x0.01	6.19E+07	3.13E+05	0.51%
	1	3	100x100x0.01	8.81E+07	4.41E+05	0.50%
	1	5	100x100x0.01	1.30E+08	7.18E+05	0.55%
	3	1	100x100x0.01	6.19E+07	3.13E+05	0.51%
	3	3	100x100x0.01	8.81E+07	4.41E+05	0.50%
	3	5	100x100x0.01	1.30E+08	7.20E+05	0.55%
	5	1	100x100x0.01	6.04E+07	3.07E+05	0.51%
	5	3	100x100x0.01	8.53E+07	4.29E+05	0.50%
	5	5	100x100x0.01	1.25E+08	6.99E+05	0.56%

C 4. Ergebnisse der SSAT-Simulationen in Verbindung mit der GRAS-Tiefendosiskurve

Tabelle 66: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit der GRAS-Tiefendosiskurve für einfache geometrische Körper und solare Protonen.

Form	Dicke [mm Al eq.]	Größe [mm]	Material	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Kugel	1	10	Al	1x1x0.01	6.33E+04	1.62E+02	0.26%
	2	10	Al	1x1x0.01	3.25E+04	7.80E+01	0.24%
	1	100	Al	10x10x0.01	6.32E+04	1.68E+02	0.27%
	5	100	Al	10x10x0.01	1.15E+04	2.71E+01	0.24%
	10	100	Al	10x10x0.01	4.78E+03	1.09E+01	0.23%
	1	10	Pb	1x1x0.01	6.33E+04	1.62E+02	0.26%
	2	10	Pb	1x1x0.01	3.24E+04	7.80E+01	0.24%
	1	100	Pb	10x10x0.01	6.32E+04	1.68E+02	0.27%
	5	100	Pb	10x10x0.01	1.15E+04	2.71E+01	0.24%
	10	100	Pb	10x10x0.01	4.78E+03	1.09E+01	0.23%
Box	1	10	Al	1x1x0.01	5.40E+04	1.92E+02	0.36%
	2	10	Al	1x1x0.01	2.74E+04	9.54E+01	0.35%
	1	100	Al	10x10x0.01	5.38E+04	1.98E+02	0.37%
	5	100	Al	10x10x0.01	9.33E+03	3.27E+01	0.35%
	10	100	Al	10x10x0.01	3.74E+03	1.29E+01	0.35%
	1	10	Pb	1x1x0.01	5.39E+04	1.92E+02	0.36%
	2	10	Pb	1x1x0.01	2.74E+04	9.54E+01	0.35%
	1	100	Pb	10x10x0.01	5.38E+04	1.98E+02	0.37%
	5	100	Pb	10x10x0.01	9.32E+03	3.26E+01	0.35%
	10	100	Pb	10x10x0.01	3.74E+03	1.29E+01	0.35%
Zylinder	1	10	Al	1x1x0.01	5.77E+04	1.81E+02	0.31%
	2	10	Al	1x1x0.01	2.95E+04	8.89E+01	0.30%
	1	100	Al	10x10x0.01	5.75E+04	1.89E+02	0.33%
	5	100	Al	10x10x0.01	1.02E+04	3.12E+01	0.31%
	10	100	Al	10x10x0.01	4.13E+03	1.25E+01	0.30%
	1	10	Pb	1x1x0.01	5.76E+04	1.81E+02	0.31%
	2	10	Pb	1x1x0.01	2.94E+04	8.89E+01	0.30%
	1	100	Pb	10x10x0.01	5.75E+04	1.89E+02	0.33%
	5	100	Pb	10x10x0.01	1.01E+04	3.12E+01	0.31%
	10	100	Pb	10x10x0.01	4.12E+03	1.25E+01	0.30%

9. Anhang

Tabelle 67: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit der GRAS-Tiefendosiskurve für einfache geometrische Körper und Van-Allen-Elektronen.

Form	Dicke [mm Al eq.]	Größe [mm]	Material	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Kugel	1	10	Al	1x1x0.01	3.49E+07	8.69E+04	0.25%
	2	10	Al	1x1x0.01	8.08E+06	1.90E+04	0.24%
	1	100	Al	10x10x0.01	3.48E+07	8.72E+04	0.25%
	5	100	Al	10x10x0.01	6.89E+04	1.53E+02	0.22%
	10	100	Al	10x10x0.01	6.50E+03	1.51E+01	0.23%
	1	10	Pb	1x1x0.01	3.48E+07	8.68E+04	0.25%
	2	10	Pb	1x1x0.01	8.07E+06	1.90E+04	0.24%
	1	100	Pb	10x10x0.01	3.48E+07	8.72E+04	0.25%
	5	100	Pb	10x10x0.01	6.87E+04	1.53E+02	0.22%
	10	100	Pb	10x10x0.01	6.50E+03	1.51E+01	0.23%
Box	1	10	Al	1x1x0.01	2.69E+07	9.38E+04	0.35%
	2	10	Al	1x1x0.01	5.27E+06	1.77E+04	0.34%
	1	100	Al	10x10x0.01	2.69E+07	9.43E+04	0.35%
	5	100	Al	10x10x0.01	2.83E+04	9.64E+01	0.34%
	10	100	Al	10x10x0.01	5.95E+03	2.10E+01	0.35%
	1	10	Pb	1x1x0.01	2.69E+07	9.37E+04	0.35%
	2	10	Pb	1x1x0.01	5.25E+06	1.77E+04	0.34%
	1	100	Pb	10x10x0.01	2.68E+07	9.42E+04	0.35%
	5	100	Pb	10x10x0.01	2.81E+04	9.61E+01	0.34%
	10	100	Pb	10x10x0.01	5.94E+03	2.10E+01	0.35%
Zylinder	1	10	Al	1x1x0.01	3.01E+07	9.34E+04	0.31%
	2	10	Al	1x1x0.01	6.38E+06	1.92E+04	0.30%
	1	100	Al	10x10x0.01	3.00E+07	9.43E+04	0.31%
	5	100	Al	10x10x0.01	4.06E+04	1.21E+02	0.30%
	10	100	Al	10x10x0.01	6.15E+03	1.88E+01	0.31%
	1	10	Pb	1x1x0.01	3.01E+07	9.34E+04	0.31%
	2	10	Pb	1x1x0.01	6.37E+06	1.91E+04	0.30%
	1	100	Pb	10x10x0.01	3.00E+07	9.43E+04	0.31%
	5	100	Pb	10x10x0.01	4.04E+04	1.20E+02	0.30%
	10	100	Pb	10x10x0.01	6.14E+03	1.88E+01	0.31%

9. Anhang

Tabelle 68: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit der GRAS-Tiefendosiskurve für den Satelliten mit 10 Volumina in verschiedenen Konfigurationen und solare Protonen. Die Positionsangaben des Targets beziehen sich auf ein Koordinatensystem mit Ursprung in der Mitte des Satelliten.

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
0/0/0	1	1	80x150x0.01	6.62E+03	5.46E+01	0.88%
	1	3	80x150x0.01	7.36E+03	6.49E+01	0.99%
	1	5	80x150x0.01	8.08E+03	6.62E+01	0.85%
	3	1	80x150x0.01	7.59E+03	5.97E+01	0.77%
	3	3	80x150x0.01	8.51E+03	7.15E+01	0.86%
	3	5	80x150x0.01	9.42E+03	7.36E+01	0.74%
	5	1	80x150x0.01	8.00E+03	6.05E+01	0.75%
	5	3	80x150x0.01	8.94E+03	7.20E+01	0.83%
	5	5	80x150x0.01	9.93E+03	7.42E+01	0.71%
1/0/0	1	1	10.01x100x100	2.42E+04	1.70E+02	0.64%
	1	3	10.01x100x100	3.13E+04	2.14E+02	0.63%
	1	5	10.01x100x100	4.10E+04	3.05E+02	0.70%
	3	1	10.01x100x100	2.46E+04	1.71E+02	0.63%
	3	3	10.01x100x100	3.19E+04	2.15E+02	0.62%
	3	5	10.01x100x100	4.17E+04	3.07E+02	0.69%
	5	1	10.01x100x100	2.49E+04	1.72E+02	0.62%
	5	3	10.01x100x100	3.23E+04	2.16E+02	0.62%
	5	5	10.01x100x100	4.23E+04	3.08E+02	0.69%
0/1/0	1	1	100x0.01x100	1.44E+04	1.16E+02	0.75%
	1	3	100x0.01x100	1.84E+04	1.42E+02	0.72%
	1	5	100x0.01x100	2.34E+04	2.01E+02	0.82%
	3	1	100x0.01x100	1.57E+04	1.23E+02	0.72%
	3	3	100x0.01x100	2.01E+04	1.51E+02	0.71%
	3	5	100x0.01x100	2.58E+04	2.12E+02	0.79%
	5	1	100x0.01x100	1.63E+04	1.25E+02	0.71%
	5	3	100x0.01x100	2.08E+04	1.53E+02	0.69%
	5	5	100x0.01x100	2.67E+04	2.14E+02	0.77%
1/1/1	1	1	100x100x0.01	3.52E+04	1.99E+02	0.51%
	1	3	100x100x0.01	4.57E+04	2.49E+02	0.50%
	1	5	100x100x0.01	5.97E+04	3.52E+02	0.55%
	3	1	100x100x0.01	3.53E+04	1.99E+02	0.51%
	3	3	100x100x0.01	4.57E+04	2.50E+02	0.50%
	3	5	100x100x0.01	5.98E+04	3.53E+02	0.55%
	5	1	100x100x0.01	3.41E+04	1.93E+02	0.51%
	5	3	100x100x0.01	4.41E+04	2.42E+02	0.50%
	5	5	100x100x0.01	5.75E+04	3.43E+02	0.56%

9. Anhang

Tabelle 69: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit der GRAS-Tiefendosiskurve für den Satelliten mit 10 Volumina in verschiedenen Konfigurationen und Van-Allen-Elektronen. Die Positionsangaben des Targets beziehen sich auf ein Koordinatensystem mit Ursprung in der Mitte des Satelliten.

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
0/0/0	1	1	80x150x0.01	9.63E+05	8.40E+03	0.87%
	1	3	80x150x0.01	1.38E+06	1.36E+04	0.99%
	1	5	80x150x0.01	1.94E+06	1.64E+04	0.85%
	3	1	80x150x0.01	1.24E+06	9.45E+03	0.76%
	3	3	80x150x0.01	1.77E+06	1.52E+04	0.86%
	3	5	80x150x0.01	2.50E+06	1.85E+04	0.74%
	5	1	80x150x0.01	1.30E+06	9.68E+03	0.75%
	5	3	80x150x0.01	1.89E+06	1.56E+04	0.83%
	5	5	80x150x0.01	2.66E+06	1.90E+04	0.71%
1/0/0	1	1	10.01x100x100	9.91E+06	6.20E+04	0.63%
	1	3	10.01x100x100	1.56E+07	9.50E+04	0.61%
	1	5	10.01x100x100	2.29E+07	1.59E+05	0.69%
	3	1	10.01x100x100	1.01E+07	6.26E+04	0.62%
	3	3	10.01x100x100	1.59E+07	9.59E+04	0.60%
	3	5	10.01x100x100	2.33E+07	1.60E+05	0.68%
	5	1	10.01x100x100	1.02E+07	6.30E+04	0.62%
	5	3	10.01x100x100	1.61E+07	9.66E+04	0.60%
	5	5	10.01x100x100	2.36E+07	1.61E+05	0.68%
0/1/0	1	1	100x0.01x100	6.67E+06	4.92E+04	0.74%
	1	3	100x0.01x100	1.00E+07	7.14E+04	0.71%
	1	5	100x0.01x100	1.39E+07	1.13E+05	0.81%
	3	1	100x0.01x100	7.25E+06	5.20E+04	0.72%
	3	3	100x0.01x100	1.10E+07	7.66E+04	0.69%
	3	5	100x0.01x100	1.55E+07	1.21E+05	0.78%
	5	1	100x0.01x100	7.50E+06	5.26E+04	0.70%
	5	3	100x0.01x100	1.14E+07	7.74E+04	0.68%
	5	5	100x0.01x100	1.60E+07	1.22E+05	0.76%
1/1/1	1	1	100x100x0.01	1.56E+07	7.76E+04	0.50%
	1	3	100x100x0.01	2.43E+07	1.18E+05	0.49%
	1	5	100x100x0.01	3.51E+07	1.93E+05	0.55%
	3	1	100x100x0.01	1.56E+07	7.76E+04	0.50%
	3	3	100x100x0.01	2.43E+07	1.18E+05	0.49%
	3	5	100x100x0.01	3.51E+07	1.93E+05	0.55%
	5	1	100x100x0.01	1.53E+07	7.63E+04	0.50%
	5	3	100x100x0.01	2.36E+07	1.16E+05	0.49%
	5	5	100x100x0.01	3.39E+07	1.87E+05	0.55%

9. Anhang

Tabelle 70: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit der GRAS-Tiefendosiskurve für den Satelliten mit 100 Volumina in verschiedenen Konfigurationen und solare Protonen.

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	1	2	100x100x0.01	1.26E+04	9.74E+01	0.77%
Det_3_2	1	2	100x100x0.01	1.10E+04	9.41E+01	0.86%
Det_3_3	1	2	100x100x0.01	9.62E+03	8.05E+01	0.84%
Det_4_1	1	2	100x100x0.01	6.56E+03	6.48E+01	0.99%
Det_4_2	1	2	100x100x0.01	7.18E+03	6.68E+01	0.93%
Det_4_3	1	2	100x100x0.01	3.01E+03	3.95E+01	1.31%
Det_4_4	1	2	100x100x0.01	1.16E+04	8.48E+01	0.73%
Det_5_1	1	2	100x100x0.01	7.90E+03	7.21E+01	0.91%
Det_5_2	1	2	100x100x0.01	1.14E+04	8.89E+01	0.78%
Det_5_3	1	2	100x100x0.01	1.07E+04	9.08E+01	0.85%
Det_5_4	1	2	100x100x0.01	7.63E+03	7.62E+01	1.00%
Det_6_1	1	2	100x100x0.01	6.45E+03	6.62E+01	1.03%
Det_6_2	1	2	100x100x0.01	8.28E+03	7.72E+01	0.93%
Det_6_3	1	2	100x100x0.01	1.10E+04	8.12E+01	0.74%
Det_7_1	1	2	100x100x0.01	7.42E+03	6.93E+01	0.93%
Det_7_2	1	2	100x100x0.01	8.27E+03	6.92E+01	0.84%
Det_8_1	1	2	100x100x0.01	3.11E+04	1.87E+02	0.60%
Det_3_1	1	5	100x100x0.01	1.59E+04	1.16E+02	0.73%
Det_3_2	1	5	100x100x0.01	1.38E+04	1.15E+02	0.83%
Det_3_3	1	5	100x100x0.01	1.21E+04	9.78E+01	0.81%
Det_4_1	1	5	100x100x0.01	8.35E+03	7.98E+01	0.96%
Det_4_2	1	5	100x100x0.01	9.01E+03	8.41E+01	0.93%
Det_4_3	1	5	100x100x0.01	3.60E+03	4.63E+01	1.29%
Det_4_4	1	5	100x100x0.01	1.44E+04	1.03E+02	0.71%
Det_5_1	1	5	100x100x0.01	9.85E+03	9.09E+01	0.92%
Det_5_2	1	5	100x100x0.01	1.43E+04	1.09E+02	0.76%
Det_5_3	1	5	100x100x0.01	1.34E+04	1.10E+02	0.83%
Det_5_4	1	5	100x100x0.01	9.50E+03	9.18E+01	0.97%
Det_6_1	1	5	100x100x0.01	8.05E+03	8.09E+01	1.00%
Det_6_2	1	5	100x100x0.01	1.03E+04	9.59E+01	0.94%
Det_6_3	1	5	100x100x0.01	1.37E+04	9.93E+01	0.72%
Det_7_1	1	5	100x100x0.01	9.28E+03	8.66E+01	0.93%
Det_7_2	1	5	100x100x0.01	1.03E+04	8.65E+01	0.84%
Det_8_1	1	5	100x100x0.01	3.12E+04	1.88E+02	0.60%
Det_3_1	1	9	100x100x0.01	1.59E+04	1.16E+02	0.73%
Det_3_2	1	9	100x100x0.01	1.37E+04	1.15E+02	0.83%
Det_3_3	1	9	100x100x0.01	1.21E+04	9.78E+01	0.81%
Det_4_1	1	9	100x100x0.01	8.34E+03	7.98E+01	0.96%
Det_4_2	1	9	100x100x0.01	9.01E+03	8.40E+01	0.93%
Det_4_3	1	9	100x100x0.01	3.59E+03	4.63E+01	1.29%
Det_4_4	1	9	100x100x0.01	1.44E+04	1.03E+02	0.71%
Det_5_1	1	9	100x100x0.01	9.84E+03	9.08E+01	0.92%
Det_5_2	1	9	100x100x0.01	1.43E+04	1.09E+02	0.76%
Det_5_3	1	9	100x100x0.01	1.34E+04	1.10E+02	0.83%
Det_5_4	1	9	100x100x0.01	9.49E+03	9.17E+01	0.97%
Det_6_1	1	9	100x100x0.01	8.02E+03	8.06E+01	1.00%
Det_6_2	1	9	100x100x0.01	1.02E+04	9.57E+01	0.94%
Det_6_3	1	9	100x100x0.01	1.37E+04	9.91E+01	0.72%
Det_7_1	1	9	100x100x0.01	9.26E+03	8.64E+01	0.93%
Det_7_2	1	9	100x100x0.01	1.03E+04	8.63E+01	0.84%
Det_8_1	1	9	100x100x0.01	3.12E+04	1.88E+02	0.60%

9. Anhang

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	3	2	100x100x0.01	1.26E+04	9.77E+01	0.77%
Det_3_2	3	2	100x100x0.01	1.09E+04	9.39E+01	0.86%
Det_3_3	3	2	100x100x0.01	9.56E+03	8.05E+01	0.84%
Det_4_1	3	2	100x100x0.01	6.50E+03	6.48E+01	1.00%
Det_4_2	3	2	100x100x0.01	7.17E+03	6.63E+01	0.93%
Det_4_3	3	2	100x100x0.01	3.02E+03	4.00E+01	1.33%
Det_4_4	3	2	100x100x0.01	1.16E+04	8.47E+01	0.73%
Det_5_1	3	2	100x100x0.01	7.93E+03	7.22E+01	0.91%
Det_5_2	3	2	100x100x0.01	1.14E+04	8.88E+01	0.78%
Det_5_3	3	2	100x100x0.01	1.06E+04	9.06E+01	0.85%
Det_5_4	3	2	100x100x0.01	7.57E+03	7.59E+01	1.00%
Det_6_1	3	2	100x100x0.01	6.43E+03	6.59E+01	1.03%
Det_6_2	3	2	100x100x0.01	8.17E+03	7.59E+01	0.93%
Det_6_3	3	2	100x100x0.01	1.10E+04	8.16E+01	0.74%
Det_7_1	3	2	100x100x0.01	7.45E+03	6.95E+01	0.93%
Det_7_2	3	2	100x100x0.01	8.29E+03	6.88E+01	0.83%
Det_8_1	3	2	100x100x0.01	3.10E+04	1.87E+02	0.60%
Det_3_1	3	5	100x100x0.01	1.59E+04	1.16E+02	0.73%
Det_3_2	3	5	100x100x0.01	1.37E+04	1.14E+02	0.83%
Det_3_3	3	5	100x100x0.01	1.20E+04	9.75E+01	0.81%
Det_4_1	3	5	100x100x0.01	8.26E+03	7.95E+01	0.96%
Det_4_2	3	5	100x100x0.01	9.00E+03	8.36E+01	0.93%
Det_4_3	3	5	100x100x0.01	3.60E+03	4.66E+01	1.30%
Det_4_4	3	5	100x100x0.01	1.45E+04	1.03E+02	0.71%
Det_5_1	3	5	100x100x0.01	9.88E+03	9.10E+01	0.92%
Det_5_2	3	5	100x100x0.01	1.43E+04	1.09E+02	0.76%
Det_5_3	3	5	100x100x0.01	1.33E+04	1.10E+02	0.83%
Det_5_4	3	5	100x100x0.01	9.44E+03	9.16E+01	0.97%
Det_6_1	3	5	100x100x0.01	8.03E+03	8.07E+01	1.01%
Det_6_2	3	5	100x100x0.01	1.01E+04	9.45E+01	0.93%
Det_6_3	3	5	100x100x0.01	1.37E+04	9.97E+01	0.73%
Det_7_1	3	5	100x100x0.01	9.32E+03	8.68E+01	0.93%
Det_7_2	3	5	100x100x0.01	1.04E+04	8.64E+01	0.83%
Det_8_1	3	5	100x100x0.01	3.10E+04	1.87E+02	0.60%
Det_3_1	3	9	100x100x0.01	1.59E+04	1.16E+02	0.73%
Det_3_2	3	9	100x100x0.01	1.37E+04	1.14E+02	0.83%
Det_3_3	3	9	100x100x0.01	1.20E+04	9.75E+01	0.81%
Det_4_1	3	9	100x100x0.01	8.26E+03	7.95E+01	0.96%
Det_4_2	3	9	100x100x0.01	8.99E+03	8.36E+01	0.93%
Det_4_3	3	9	100x100x0.01	3.59E+03	4.66E+01	1.30%
Det_4_4	3	9	100x100x0.01	1.44E+04	1.03E+02	0.71%
Det_5_1	3	9	100x100x0.01	9.86E+03	9.08E+01	0.92%
Det_5_2	3	9	100x100x0.01	1.43E+04	1.09E+02	0.76%
Det_5_3	3	9	100x100x0.01	1.33E+04	1.10E+02	0.83%
Det_5_4	3	9	100x100x0.01	9.42E+03	9.15E+01	0.97%
Det_6_1	3	9	100x100x0.01	8.00E+03	8.04E+01	1.00%
Det_6_2	3	9	100x100x0.01	1.01E+04	9.43E+01	0.93%
Det_6_3	3	9	100x100x0.01	1.37E+04	9.95E+01	0.73%
Det_7_1	3	9	100x100x0.01	9.29E+03	8.66E+01	0.93%
Det_7_2	3	9	100x100x0.01	1.03E+04	8.62E+01	0.83%
Det_8_1	3	9	100x100x0.01	3.10E+04	1.87E+02	0.60%

9. Anhang

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	9	2	100x100x0.01	1.25E+04	9.68E+01	0.78%
Det_3_2	9	2	100x100x0.01	1.08E+04	9.32E+01	0.86%
Det_3_3	9	2	100x100x0.01	9.42E+03	8.04E+01	0.85%
Det_4_1	9	2	100x100x0.01	6.49E+03	6.48E+01	1.00%
Det_4_2	9	2	100x100x0.01	7.17E+03	6.64E+01	0.93%
Det_4_3	9	2	100x100x0.01	3.07E+03	4.10E+01	1.34%
Det_4_4	9	2	100x100x0.01	1.15E+04	8.46E+01	0.73%
Det_5_1	9	2	100x100x0.01	7.95E+03	7.23E+01	0.91%
Det_5_2	9	2	100x100x0.01	1.13E+04	8.88E+01	0.79%
Det_5_3	9	2	100x100x0.01	1.06E+04	9.05E+01	0.85%
Det_5_4	9	2	100x100x0.01	7.89E+03	7.72E+01	0.98%
Det_6_1	9	2	100x100x0.01	6.62E+03	6.73E+01	1.02%
Det_6_2	9	2	100x100x0.01	8.21E+03	7.60E+01	0.93%
Det_6_3	9	2	100x100x0.01	1.10E+04	8.14E+01	0.74%
Det_7_1	9	2	100x100x0.01	7.45E+03	6.96E+01	0.93%
Det_7_2	9	2	100x100x0.01	8.32E+03	6.92E+01	0.83%
Det_8_1	9	2	100x100x0.01	3.08E+04	1.86E+02	0.60%
Det_3_1	9	5	100x100x0.01	1.57E+04	1.15E+02	0.73%
Det_3_2	9	5	100x100x0.01	1.36E+04	1.14E+02	0.84%
Det_3_3	9	5	100x100x0.01	1.18E+04	9.70E+01	0.82%
Det_4_1	9	5	100x100x0.01	8.25E+03	7.95E+01	0.96%
Det_4_2	9	5	100x100x0.01	9.00E+03	8.37E+01	0.93%
Det_4_3	9	5	100x100x0.01	3.66E+03	4.78E+01	1.31%
Det_4_4	9	5	100x100x0.01	1.43E+04	1.03E+02	0.72%
Det_5_1	9	5	100x100x0.01	9.91E+03	9.11E+01	0.92%
Det_5_2	9	5	100x100x0.01	1.41E+04	1.08E+02	0.77%
Det_5_3	9	5	100x100x0.01	1.33E+04	1.10E+02	0.83%
Det_5_4	9	5	100x100x0.01	9.84E+03	9.32E+01	0.95%
Det_6_1	9	5	100x100x0.01	8.28E+03	8.21E+01	0.99%
Det_6_2	9	5	100x100x0.01	1.02E+04	9.45E+01	0.93%
Det_6_3	9	5	100x100x0.01	1.37E+04	9.96E+01	0.73%
Det_7_1	9	5	100x100x0.01	9.32E+03	8.69E+01	0.93%
Det_7_2	9	5	100x100x0.01	1.04E+04	8.67E+01	0.83%
Det_8_1	9	5	100x100x0.01	3.09E+04	1.87E+02	0.61%
Det_3_1	9	9	100x100x0.01	1.57E+04	1.15E+02	0.73%
Det_3_2	9	9	100x100x0.01	1.35E+04	1.13E+02	0.84%
Det_3_3	9	9	100x100x0.01	1.18E+04	9.69E+01	0.82%
Det_4_1	9	9	100x100x0.01	8.24E+03	7.95E+01	0.96%
Det_4_2	9	9	100x100x0.01	9.00E+03	8.36E+01	0.93%
Det_4_3	9	9	100x100x0.01	3.66E+03	4.78E+01	1.31%
Det_4_4	9	9	100x100x0.01	1.43E+04	1.02E+02	0.72%
Det_5_1	9	9	100x100x0.01	9.89E+03	9.10E+01	0.92%
Det_5_2	9	9	100x100x0.01	1.41E+04	1.08E+02	0.77%
Det_5_3	9	9	100x100x0.01	1.32E+04	1.10E+02	0.83%
Det_5_4	9	9	100x100x0.01	9.83E+03	9.31E+01	0.95%
Det_6_1	9	9	100x100x0.01	8.25E+03	8.18E+01	0.99%
Det_6_2	9	9	100x100x0.01	1.01E+04	9.43E+01	0.93%
Det_6_3	9	9	100x100x0.01	1.37E+04	9.93E+01	0.73%
Det_7_1	9	9	100x100x0.01	9.30E+03	8.67E+01	0.93%
Det_7_2	9	9	100x100x0.01	1.04E+04	8.65E+01	0.83%
Det_8_1	9	9	100x100x0.01	3.09E+04	1.87E+02	0.61%

9. Anhang

Tabelle 71: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit der GRAS-Tiefendosiskurve für den Satelliten mit 100 Volumina in verschiedenen Konfigurationen und Van-Allen-Elektronen.

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	1	2	100x100x0.01	1.90E+06	1.77E+04	0.93%
Det_3_2	1	2	100x100x0.01	1.56E+06	1.67E+04	1.08%
Det_3_3	1	2	100x100x0.01	1.23E+06	1.26E+04	1.02%
Det_4_1	1	2	100x100x0.01	8.60E+05	9.38E+03	1.09%
Det_4_2	1	2	100x100x0.01	9.35E+05	8.69E+03	0.93%
Det_4_3	1	2	100x100x0.01	1.19E+05	3.73E+03	3.12%
Det_4_4	1	2	100x100x0.01	1.81E+06	1.44E+04	0.80%
Det_5_1	1	2	100x100x0.01	9.39E+05	8.95E+03	0.95%
Det_5_2	1	2	100x100x0.01	1.52E+06	1.41E+04	0.93%
Det_5_3	1	2	100x100x0.01	1.42E+06	1.55E+04	1.09%
Det_5_4	1	2	100x100x0.01	1.08E+06	1.30E+04	1.20%
Det_6_1	1	2	100x100x0.01	8.66E+05	1.07E+04	1.24%
Det_6_2	1	2	100x100x0.01	9.86E+05	1.11E+04	1.12%
Det_6_3	1	2	100x100x0.01	1.66E+06	1.32E+04	0.79%
Det_7_1	1	2	100x100x0.01	1.02E+06	1.07E+04	1.05%
Det_7_2	1	2	100x100x0.01	1.18E+06	1.07E+04	0.91%
Det_8_1	1	2	100x100x0.01	1.36E+07	7.65E+04	0.56%
Det_3_1	1	5	100x100x0.01	3.44E+06	2.57E+04	0.75%
Det_3_2	1	5	100x100x0.01	2.71E+06	2.43E+04	0.89%
Det_3_3	1	5	100x100x0.01	2.31E+06	1.93E+04	0.84%
Det_4_1	1	5	100x100x0.01	1.54E+06	1.52E+04	0.99%
Det_4_2	1	5	100x100x0.01	1.78E+06	1.64E+04	0.92%
Det_4_3	1	5	100x100x0.01	1.96E+05	4.95E+03	2.53%
Det_4_4	1	5	100x100x0.01	3.34E+06	2.32E+04	0.70%
Det_5_1	1	5	100x100x0.01	1.74E+06	1.65E+04	0.95%
Det_5_2	1	5	100x100x0.01	2.80E+06	2.24E+04	0.80%
Det_5_3	1	5	100x100x0.01	2.53E+06	2.31E+04	0.91%
Det_5_4	1	5	100x100x0.01	1.97E+06	2.01E+04	1.02%
Det_6_1	1	5	100x100x0.01	1.59E+06	1.72E+04	1.08%
Det_6_2	1	5	100x100x0.01	1.81E+06	1.87E+04	1.03%
Det_6_3	1	5	100x100x0.01	3.07E+06	2.19E+04	0.72%
Det_7_1	1	5	100x100x0.01	1.87E+06	1.82E+04	0.98%
Det_7_2	1	5	100x100x0.01	2.17E+06	1.82E+04	0.84%
Det_8_1	1	5	100x100x0.01	1.36E+07	7.65E+04	0.56%
Det_3_1	1	9	100x100x0.01	3.44E+06	2.57E+04	0.75%
Det_3_2	1	9	100x100x0.01	2.71E+06	2.42E+04	0.89%
Det_3_3	1	9	100x100x0.01	2.31E+06	1.93E+04	0.84%
Det_4_1	1	9	100x100x0.01	1.54E+06	1.52E+04	0.99%
Det_4_2	1	9	100x100x0.01	1.78E+06	1.64E+04	0.92%
Det_4_3	1	9	100x100x0.01	1.96E+05	4.95E+03	2.53%
Det_4_4	1	9	100x100x0.01	3.34E+06	2.32E+04	0.70%
Det_5_1	1	9	100x100x0.01	1.74E+06	1.65E+04	0.95%
Det_5_2	1	9	100x100x0.01	2.80E+06	2.24E+04	0.80%
Det_5_3	1	9	100x100x0.01	2.53E+06	2.31E+04	0.91%
Det_5_4	1	9	100x100x0.01	1.97E+06	2.01E+04	1.02%
Det_6_1	1	9	100x100x0.01	1.59E+06	1.72E+04	1.08%
Det_6_2	1	9	100x100x0.01	1.81E+06	1.87E+04	1.03%
Det_6_3	1	9	100x100x0.01	3.07E+06	2.19E+04	0.72%
Det_7_1	1	9	100x100x0.01	1.87E+06	1.82E+04	0.98%
Det_7_2	1	9	100x100x0.01	2.17E+06	1.82E+04	0.84%
Det_8_1	1	9	100x100x0.01	1.36E+07	7.65E+04	0.56%

9. Anhang

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	3	2	100x100x0.01	1.91E+06	1.78E+04	0.94%
Det_3_2	3	2	100x100x0.01	1.54E+06	1.66E+04	1.08%
Det_3_3	3	2	100x100x0.01	1.23E+06	1.27E+04	1.04%
Det_4_1	3	2	100x100x0.01	8.55E+05	9.45E+03	1.11%
Det_4_2	3	2	100x100x0.01	9.36E+05	8.52E+03	0.91%
Det_4_3	3	2	100x100x0.01	1.24E+05	3.93E+03	3.16%
Det_4_4	3	2	100x100x0.01	1.80E+06	1.43E+04	0.80%
Det_5_1	3	2	100x100x0.01	9.43E+05	8.93E+03	0.95%
Det_5_2	3	2	100x100x0.01	1.52E+06	1.41E+04	0.93%
Det_5_3	3	2	100x100x0.01	1.42E+06	1.54E+04	1.09%
Det_5_4	3	2	100x100x0.01	1.06E+06	1.29E+04	1.21%
Det_6_1	3	2	100x100x0.01	8.60E+05	1.06E+04	1.23%
Det_6_2	3	2	100x100x0.01	9.63E+05	1.06E+04	1.10%
Det_6_3	3	2	100x100x0.01	1.66E+06	1.34E+04	0.81%
Det_7_1	3	2	100x100x0.01	1.03E+06	1.08E+04	1.05%
Det_7_2	3	2	100x100x0.01	1.17E+06	1.04E+04	0.89%
Det_8_1	3	2	100x100x0.01	1.35E+07	7.63E+04	0.56%
Det_3_1	3	5	100x100x0.01	3.45E+06	2.59E+04	0.75%
Det_3_2	3	5	100x100x0.01	2.69E+06	2.40E+04	0.89%
Det_3_3	3	5	100x100x0.01	2.30E+06	1.93E+04	0.84%
Det_4_1	3	5	100x100x0.01	1.52E+06	1.52E+04	1.00%
Det_4_2	3	5	100x100x0.01	1.78E+06	1.63E+04	0.91%
Det_4_3	3	5	100x100x0.01	2.01E+05	5.11E+03	2.54%
Det_4_4	3	5	100x100x0.01	3.34E+06	2.33E+04	0.70%
Det_5_1	3	5	100x100x0.01	1.75E+06	1.65E+04	0.95%
Det_5_2	3	5	100x100x0.01	2.79E+06	2.23E+04	0.80%
Det_5_3	3	5	100x100x0.01	2.52E+06	2.30E+04	0.91%
Det_5_4	3	5	100x100x0.01	1.94E+06	2.00E+04	1.03%
Det_6_1	3	5	100x100x0.01	1.58E+06	1.71E+04	1.08%
Det_6_2	3	5	100x100x0.01	1.77E+06	1.81E+04	1.02%
Det_6_3	3	5	100x100x0.01	3.08E+06	2.21E+04	0.72%
Det_7_1	3	5	100x100x0.01	1.88E+06	1.84E+04	0.98%
Det_7_2	3	5	100x100x0.01	2.17E+06	1.81E+04	0.83%
Det_8_1	3	5	100x100x0.01	1.35E+07	7.63E+04	0.56%
Det_3_1	3	9	100x100x0.01	3.45E+06	2.59E+04	0.75%
Det_3_2	3	9	100x100x0.01	2.69E+06	2.40E+04	0.89%
Det_3_3	3	9	100x100x0.01	2.30E+06	1.93E+04	0.84%
Det_4_1	3	9	100x100x0.01	1.52E+06	1.52E+04	1.00%
Det_4_2	3	9	100x100x0.01	1.78E+06	1.63E+04	0.91%
Det_4_3	3	9	100x100x0.01	2.01E+05	5.11E+03	2.54%
Det_4_4	3	9	100x100x0.01	3.34E+06	2.33E+04	0.70%
Det_5_1	3	9	100x100x0.01	1.74E+06	1.65E+04	0.95%
Det_5_2	3	9	100x100x0.01	2.79E+06	2.23E+04	0.80%
Det_5_3	3	9	100x100x0.01	2.52E+06	2.30E+04	0.91%
Det_5_4	3	9	100x100x0.01	1.94E+06	2.00E+04	1.03%
Det_6_1	3	9	100x100x0.01	1.58E+06	1.71E+04	1.08%
Det_6_2	3	9	100x100x0.01	1.77E+06	1.81E+04	1.02%
Det_6_3	3	9	100x100x0.01	3.08E+06	2.21E+04	0.72%
Det_7_1	3	9	100x100x0.01	1.88E+06	1.83E+04	0.98%
Det_7_2	3	9	100x100x0.01	2.17E+06	1.81E+04	0.83%
Det_8_1	3	9	100x100x0.01	1.35E+07	7.63E+04	0.56%

9. Anhang

Target-Position	# Formen	# Materialien	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Det_3_1	9	2	100x100x0.01	1.90E+06	1.76E+04	0.93%
Det_3_2	9	2	100x100x0.01	1.54E+06	1.66E+04	1.07%
Det_3_3	9	2	100x100x0.01	1.22E+06	1.27E+04	1.05%
Det_4_1	9	2	100x100x0.01	8.51E+05	9.47E+03	1.11%
Det_4_2	9	2	100x100x0.01	9.34E+05	8.53E+03	0.91%
Det_4_3	9	2	100x100x0.01	1.31E+05	4.14E+03	3.16%
Det_4_4	9	2	100x100x0.01	1.79E+06	1.43E+04	0.80%
Det_5_1	9	2	100x100x0.01	9.41E+05	8.91E+03	0.95%
Det_5_2	9	2	100x100x0.01	1.51E+06	1.41E+04	0.94%
Det_5_3	9	2	100x100x0.01	1.41E+06	1.54E+04	1.09%
Det_5_4	9	2	100x100x0.01	1.09E+06	1.30E+04	1.19%
Det_6_1	9	2	100x100x0.01	8.77E+05	1.07E+04	1.22%
Det_6_2	9	2	100x100x0.01	9.68E+05	1.05E+04	1.09%
Det_6_3	9	2	100x100x0.01	1.66E+06	1.33E+04	0.80%
Det_7_1	9	2	100x100x0.01	1.02E+06	1.08E+04	1.05%
Det_7_2	9	2	100x100x0.01	1.18E+06	1.06E+04	0.90%
Det_8_1	9	2	100x100x0.01	1.35E+07	7.56E+04	0.56%
Det_3_1	9	5	100x100x0.01	3.42E+06	2.56E+04	0.75%
Det_3_2	9	5	100x100x0.01	2.69E+06	2.41E+04	0.89%
Det_3_3	9	5	100x100x0.01	2.26E+06	1.93E+04	0.85%
Det_4_1	9	5	100x100x0.01	1.52E+06	1.52E+04	1.00%
Det_4_2	9	5	100x100x0.01	1.78E+06	1.63E+04	0.91%
Det_4_3	9	5	100x100x0.01	2.12E+05	5.39E+03	2.54%
Det_4_4	9	5	100x100x0.01	3.31E+06	2.32E+04	0.70%
Det_5_1	9	5	100x100x0.01	1.74E+06	1.65E+04	0.95%
Det_5_2	9	5	100x100x0.01	2.75E+06	2.22E+04	0.81%
Det_5_3	9	5	100x100x0.01	2.51E+06	2.29E+04	0.91%
Det_5_4	9	5	100x100x0.01	2.02E+06	2.03E+04	1.01%
Det_6_1	9	5	100x100x0.01	1.62E+06	1.73E+04	1.06%
Det_6_2	9	5	100x100x0.01	1.78E+06	1.80E+04	1.01%
Det_6_3	9	5	100x100x0.01	3.07E+06	2.21E+04	0.72%
Det_7_1	9	5	100x100x0.01	1.87E+06	1.83E+04	0.98%
Det_7_2	9	5	100x100x0.01	2.18E+06	1.83E+04	0.84%
Det_8_1	9	5	100x100x0.01	1.35E+07	7.56E+04	0.56%
Det_3_1	9	9	100x100x0.01	3.42E+06	2.56E+04	0.75%
Det_3_2	9	9	100x100x0.01	2.69E+06	2.40E+04	0.89%
Det_3_3	9	9	100x100x0.01	2.26E+06	1.93E+04	0.85%
Det_4_1	9	9	100x100x0.01	1.52E+06	1.52E+04	1.00%
Det_4_2	9	9	100x100x0.01	1.78E+06	1.63E+04	0.91%
Det_4_3	9	9	100x100x0.01	2.12E+05	5.39E+03	2.55%
Det_4_4	9	9	100x100x0.01	3.31E+06	2.32E+04	0.70%
Det_5_1	9	9	100x100x0.01	1.74E+06	1.65E+04	0.95%
Det_5_2	9	9	100x100x0.01	2.75E+06	2.22E+04	0.81%
Det_5_3	9	9	100x100x0.01	2.51E+06	2.29E+04	0.91%
Det_5_4	9	9	100x100x0.01	2.02E+06	2.03E+04	1.01%
Det_6_1	9	9	100x100x0.01	1.62E+06	1.73E+04	1.06%
Det_6_2	9	9	100x100x0.01	1.78E+06	1.80E+04	1.01%
Det_6_3	9	9	100x100x0.01	3.07E+06	2.21E+04	0.72%
Det_7_1	9	9	100x100x0.01	1.87E+06	1.83E+04	0.98%
Det_7_2	9	9	100x100x0.01	2.18E+06	1.82E+04	0.84%
Det_8_1	9	9	100x100x0.01	1.35E+07	7.56E+04	0.56%

9. Anhang

Tabelle 72: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit der GRAS-Tiefendosiskurve für den Satelliten mit maximaler Komplexität und solare Protonen.

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
1	3_2_O	80x80x1	4.72E+03	4.60E+01	0.98%
	3_2_U	80x80x1	3.22E+03	3.09E+01	0.96%
	4_1_OH	80x80x1	1.93E+02	6.14E+00	3.19%
	4_1_OV	80x80x1	3.04E+02	8.88E+00	2.92%
	4_2_1_VO	80x80x1	2.26E+03	2.13E+01	0.95%
	4_2_1_VU	80x80x1	2.29E+03	2.21E+01	0.96%
	4_2_2_VO	80x80x1	1.43E+03	1.64E+01	1.15%
	4_2_2_VU	80x80x1	1.35E+03	1.42E+01	1.05%
	4_2_2_HO	80x80x1	1.50E+03	2.34E+01	1.56%
	4_2_2_HU	80x80x1	2.46E+03	3.08E+01	1.25%
	4_3_2_V	80x80x1	1.28E+03	1.53E+01	1.19%
	4_3_2_H	80x80x1	1.84E+03	2.71E+01	1.47%
	5_1_V	80x80x1	2.99E+03	2.63E+01	0.88%
	5_1_H	80x80x1	4.94E+03	5.30E+01	1.07%
	5_3_VO	80x80x1	2.72E+03	2.38E+01	0.88%
	5_3_VM	80x80x1	2.63E+03	2.38E+01	0.91%
	5_3_VU	80x80x1	2.67E+03	2.60E+01	0.97%
	5_3_HO	80x80x1	4.51E+03	5.05E+01	1.12%
	5_3_HM	80x80x1	4.27E+03	4.94E+01	1.16%
	5_3_HU	80x80x1	4.13E+03	4.85E+01	1.18%
8_4_1_V	80x80x1	1.31E+03	2.16E+01	1.65%	
8_4_1_H	80x80x1	1.23E+03	1.55E+01	1.26%	
2	3_2_O	30x30x1	5.95E+03	4.56E+01	0.77%
	3_2_U	30x30x1	9.18E+03	6.97E+01	0.76%
	4_1_OH	30x30x1	5.31E+02	1.52E+01	2.87%
	4_1_OV	30x30x1	1.51E+03	3.29E+01	2.18%
	4_2_1_VO	30x30x1	5.64E+03	5.96E+01	1.06%
	4_2_1_VU	30x30x1	7.30E+03	6.77E+01	0.93%
	4_2_2_VO	30x30x1	2.59E+03	3.58E+01	1.39%
	4_2_2_VU	30x30x1	3.87E+03	4.37E+01	1.13%
	4_2_2_HO	30x30x1	1.45E+03	1.75E+01	1.21%
	4_2_2_HU	30x30x1	1.24E+03	1.55E+01	1.25%
	4_3_2_V	30x30x1	2.51E+03	3.72E+01	1.48%
	4_3_2_H	30x30x1	1.35E+03	1.75E+01	1.29%
	5_1_V	30x30x1	9.08E+03	7.62E+01	0.84%
	5_1_H	30x30x1	4.02E+03	3.75E+01	0.93%
	5_3_VO	30x30x1	8.38E+03	7.39E+01	0.88%
	5_3_VM	30x30x1	7.99E+03	7.24E+01	0.91%
	5_3_VU	30x30x1	7.78E+03	7.13E+01	0.92%
	5_3_HO	30x30x1	3.30E+03	2.84E+01	0.86%
	5_3_HM	30x30x1	3.22E+03	2.71E+01	0.84%
	5_3_HU	30x30x1	3.37E+03	3.00E+01	0.89%
8_4_1_V	30x30x1	2.65E+03	3.53E+01	1.33%	
8_4_1_H	30x30x1	2.42E+03	3.56E+01	1.47%	

9. Anhang

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
3	3_2_O	80x10x5	4.35E+03	5.52E+01	1.27%
	3_2_U	80x10x5	1.19E+04	1.04E+02	0.88%
	4_1_OH	80x10x5	6.87E+02	1.85E+01	2.69%
	4_1_OV	80x10x5	1.42E+03	3.46E+01	2.44%
	4_2_1_VO	80x10x5	8.21E+03	8.01E+01	0.98%
	4_2_1_VU	80x10x5	8.43E+03	8.39E+01	1.00%
	4_2_2_VO	80x10x5	3.68E+03	4.51E+01	1.23%
	4_2_2_VU	80x10x5	3.65E+03	4.84E+01	1.32%
	4_2_2_HO	80x10x5	1.91E+03	2.80E+01	1.47%
	4_2_2_HU	80x10x5	2.71E+03	3.54E+01	1.31%
	4_3_2_V	80x10x5	2.42E+03	3.44E+01	1.42%
	4_3_2_H	80x10x5	2.19E+03	3.02E+01	1.38%
	5_1_V	80x10x5	1.14E+04	1.07E+02	0.93%
	5_1_H	80x10x5	7.45E+03	7.26E+01	0.97%
	5_3_VO	80x10x5	1.02E+04	9.65E+01	0.94%
	5_3_VM	80x10x5	9.91E+03	9.58E+01	0.97%
	5_3_VU	80x10x5	9.93E+03	9.52E+01	0.96%
	5_3_HO	80x10x5	5.59E+03	5.82E+01	1.04%
	5_3_HM	80x10x5	5.37E+03	5.56E+01	1.03%
	5_3_HU	80x10x5	5.39E+03	5.59E+01	1.04%
8_4_1_V	80x10x5	3.54E+03	5.24E+01	1.48%	
8_4_1_H	80x10x5	2.08E+03	3.90E+01	1.88%	
4	3_2_O	80x10x1	7.42E+03	6.91E+01	0.93%
	3_2_U	80x10x1	1.14E+04	1.01E+02	0.88%
	4_1_OH	80x10x1	5.66E+02	1.79E+01	3.17%
	4_1_OV	80x10x1	2.23E+03	4.75E+01	2.13%
	4_2_1_VO	80x10x1	6.98E+03	7.47E+01	1.07%
	4_2_1_VU	80x10x1	9.04E+03	8.65E+01	0.96%
	4_2_2_VO	80x10x1	2.88E+03	4.06E+01	1.41%
	4_2_2_VU	80x10x1	4.47E+03	5.13E+01	1.15%
	4_2_2_HO	80x10x1	1.33E+03	1.79E+01	1.34%
	4_2_2_HU	80x10x1	1.06E+03	1.14E+01	1.07%
	4_3_2_V	80x10x1	3.05E+03	4.73E+01	1.55%
	4_3_2_H	80x10x1	1.57E+03	2.25E+01	1.44%
	5_1_V	80x10x1	1.14E+04	1.04E+02	0.91%
	5_1_H	80x10x1	3.52E+03	4.02E+01	1.14%
	5_3_VO	80x10x1	1.00E+04	9.30E+01	0.93%
	5_3_VM	80x10x1	9.46E+03	9.18E+01	0.97%
	5_3_VU	80x10x1	9.21E+03	9.03E+01	0.98%
	5_3_HO	80x10x1	2.44E+03	2.59E+01	1.06%
	5_3_HM	80x10x1	2.41E+03	2.53E+01	1.05%
	5_3_HU	80x10x1	2.62E+03	2.88E+01	1.10%
8_4_1_V	80x10x1	4.07E+03	6.21E+01	1.53%	
8_4_1_H	80x10x1	2.76E+03	4.45E+01	1.61%	

9. Anhang

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Dosimeter	D_01	200x80x0.1	9.85E+04	3.09E+02	0.31%
	D_02	200x80x0.1	9.61E+04	9.17E+02	0.95%
	D_03	200x80x0.1	7.10E+04	6.29E+02	0.89%
	D_04	200x80x0.1	5.27E+04	4.56E+02	0.86%
	D_05	200x80x0.1	4.16E+04	3.58E+02	0.86%
	D_06	200x80x0.1	3.39E+04	2.92E+02	0.86%
	D_07	200x80x0.1	3.11E+04	2.59E+02	0.83%
	D_08	200x80x0.1	2.55E+04	2.11E+02	0.83%
	D_09	200x80x0.1	2.28E+04	1.92E+02	0.84%
	D_10	200x80x0.1	2.06E+04	1.69E+02	0.82%
	D_11	200x80x0.5	1.87E+04	1.56E+02	0.84%
	D_12	200x80x0.5	1.25E+04	1.02E+02	0.82%
	D_13	200x80x0.5	9.23E+03	7.51E+01	0.81%
	D_14	200x80x0.5	7.25E+03	5.83E+01	0.80%
	D_15	200x80x0.5	5.84E+03	4.64E+01	0.79%
	D_16	200x80x0.5	4.85E+03	3.72E+01	0.77%
	D_17	200x80x0.5	4.13E+03	3.28E+01	0.79%
	D_18	200x80x0.5	3.58E+03	2.75E+01	0.77%

9. Anhang

Tabelle 73: Ergebnisse der SSAT-Simulationen mit der GRAS-Tiefendosiskurve für den Satelliten mit maximaler Komplexität und Van-Allen-Elektronen.

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
1	3_2_O	80x80x1	3.21E+05	3.11E+03	0.97%
	3_2_U	80x80x1	3.13E+04	1.42E+03	4.54%
	4_1_OH	80x80x1	2.18E+03	3.30E+02	15.10%
	4_1_OV	80x80x1	3.27E+03	4.00E+02	12.26%
	4_2_1_VO	80x80x1	5.56E+03	5.65E+01	1.02%
	4_2_1_VU	80x80x1	5.85E+03	5.93E+01	1.01%
	4_2_2_VO	80x80x1	3.43E+03	5.75E+01	1.68%
	4_2_2_VU	80x80x1	2.54E+03	2.75E+01	1.08%
	4_2_2_HO	80x80x1	4.08E+04	6.79E+02	1.66%
	4_2_2_HU	80x80x1	6.46E+04	8.35E+02	1.29%
	4_3_2_V	80x80x1	5.06E+03	3.06E+02	6.05%
	4_3_2_H	80x80x1	2.76E+04	8.62E+02	3.12%
	5_1_V	80x80x1	1.02E+04	2.89E+02	2.84%
	5_1_H	80x80x1	3.15E+05	4.04E+03	1.28%
	5_3_VO	80x80x1	6.70E+03	6.26E+01	0.94%
	5_3_VM	80x80x1	6.66E+03	7.17E+01	1.08%
	5_3_VU	80x80x1	1.21E+04	2.75E+02	2.28%
	5_3_HO	80x80x1	2.86E+05	3.70E+03	1.30%
	5_3_HM	80x80x1	2.67E+05	3.61E+03	1.35%
	5_3_HU	80x80x1	2.47E+05	3.50E+03	1.41%
8_4_1_V	80x80x1	1.63E+04	1.10E+03	6.80%	
8_4_1_H	80x80x1	1.03E+04	6.56E+02	6.34%	
2	3_2_O	30x30x1	1.42E+05	1.52E+03	1.07%
	3_2_U	30x30x1	1.06E+06	6.54E+03	0.62%
	4_1_OH	30x30x1	1.29E+04	9.64E+02	7.49%
	4_1_OV	30x30x1	7.09E+04	2.50E+03	3.53%
	4_2_1_VO	30x30x1	7.73E+05	7.75E+03	1.00%
	4_2_1_VU	30x30x1	9.70E+05	8.64E+03	0.89%
	4_2_2_VO	30x30x1	1.29E+05	1.93E+03	1.50%
	4_2_2_VU	30x30x1	2.07E+05	2.43E+03	1.17%
	4_2_2_HO	30x30x1	5.54E+03	1.44E+02	2.59%
	4_2_2_HU	30x30x1	2.68E+03	6.34E+01	2.36%
	4_3_2_V	30x30x1	8.52E+04	2.20E+03	2.58%
	4_3_2_H	30x30x1	1.96E+04	5.06E+02	2.58%
	5_1_V	30x30x1	1.03E+06	8.89E+03	0.86%
	5_1_H	30x30x1	5.63E+04	1.57E+03	2.79%
	5_3_VO	30x30x1	9.57E+05	8.53E+03	0.89%
	5_3_VM	30x30x1	9.05E+05	8.30E+03	0.92%
	5_3_VU	30x30x1	8.64E+05	8.11E+03	0.94%
	5_3_HO	30x30x1	1.04E+04	3.76E+02	3.61%
	5_3_HM	30x30x1	9.18E+03	2.64E+02	2.87%
	5_3_HU	30x30x1	3.76E+04	7.59E+02	2.02%
8_4_1_V	30x30x1	6.61E+04	2.06E+03	3.12%	
8_4_1_H	30x30x1	5.26E+04	2.10E+03	3.98%	

9. Anhang

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
3	3_2_O	80x10x5	5.01E+05	1.01E+04	2.01%
	3_2_U	80x10x5	2.39E+06	2.22E+04	0.93%
	4_1_OH	80x10x5	5.41E+04	2.48E+03	4.58%
	4_1_OV	80x10x5	2.63E+05	7.34E+03	2.79%
	4_2_1_VO	80x10x5	1.62E+06	1.55E+04	0.96%
	4_2_1_VU	80x10x5	1.78E+06	1.73E+04	0.97%
	4_2_2_VO	80x10x5	3.00E+05	3.78E+03	1.26%
	4_2_2_VU	80x10x5	3.11E+05	5.13E+03	1.65%
	4_2_2_HO	80x10x5	4.57E+04	8.55E+02	1.87%
	4_2_2_HU	80x10x5	7.37E+04	1.31E+03	1.78%
	4_3_2_V	80x10x5	5.30E+04	2.29E+03	4.32%
	4_3_2_H	80x10x5	1.10E+05	2.00E+03	1.83%
	5_1_V	80x10x5	2.15E+06	2.30E+04	1.07%
	5_1_H	80x10x5	8.50E+05	9.53E+03	1.12%
	5_3_VO	80x10x5	1.76E+06	1.84E+04	1.04%
	5_3_VM	80x10x5	1.69E+06	1.85E+04	1.09%
	5_3_VU	80x10x5	1.67E+06	1.84E+04	1.10%
	5_3_HO	80x10x5	3.27E+05	4.81E+03	1.47%
	5_3_HM	80x10x5	2.96E+05	4.11E+03	1.39%
	5_3_HU	80x10x5	3.28E+05	4.48E+03	1.37%
8_4_1_V	80x10x5	4.65E+05	9.15E+03	1.97%	
8_4_1_H	80x10x5	2.53E+05	6.95E+03	2.75%	
4	3_2_O	80x10x1	6.02E+05	8.19E+03	1.36%
	3_2_U	80x10x1	2.16E+06	2.03E+04	0.94%
	4_1_OH	80x10x1	7.59E+04	2.91E+03	3.84%
	4_1_OV	80x10x1	4.68E+05	1.03E+04	2.19%
	4_2_1_VO	80x10x1	1.43E+06	1.48E+04	1.03%
	4_2_1_VU	80x10x1	1.80E+06	1.74E+04	0.97%
	4_2_2_VO	80x10x1	2.37E+05	3.57E+03	1.51%
	4_2_2_VU	80x10x1	4.02E+05	5.56E+03	1.38%
	4_2_2_HO	80x10x1	1.76E+04	6.07E+02	3.45%
	4_2_2_HU	80x10x1	2.32E+03	3.83E+01	1.65%
	4_3_2_V	80x10x1	2.42E+05	6.18E+03	2.55%
	4_3_2_H	80x10x1	1.24E+05	2.91E+03	2.35%
	5_1_V	80x10x1	2.26E+06	2.28E+04	1.01%
	5_1_H	80x10x1	2.54E+05	5.11E+03	2.01%
	5_3_VO	80x10x1	1.82E+06	1.78E+04	0.98%
	5_3_VM	80x10x1	1.69E+06	1.76E+04	1.05%
	5_3_VU	80x10x1	1.61E+06	1.74E+04	1.08%
	5_3_HO	80x10x1	2.57E+04	1.07E+03	4.17%
	5_3_HM	80x10x1	3.99E+04	1.08E+03	2.71%
	5_3_HU	80x10x1	1.36E+05	2.51E+03	1.85%
8_4_1_V	80x10x1	5.40E+05	1.14E+04	2.10%	
8_4_1_H	80x10x1	2.68E+05	6.89E+03	2.58%	

9. Anhang

Bauteil	Target-Position	Targetmaße [mm]	Dosis [rad]	Fehler [rad]	Fehler in %
Dosimeter	D_01	200x80x0.1	9.68E+08	3.02E+06	0.31%
	D_02	200x80x0.1	1.19E+08	9.83E+05	0.83%
	D_03	200x80x0.1	5.56E+07	4.56E+05	0.82%
	D_04	200x80x0.1	3.61E+07	2.89E+05	0.80%
	D_05	200x80x0.1	2.60E+07	2.07E+05	0.79%
	D_06	200x80x0.1	1.98E+07	1.56E+05	0.79%
	D_07	200x80x0.1	1.76E+07	1.32E+05	0.75%
	D_08	200x80x0.1	1.34E+07	9.74E+04	0.73%
	D_09	200x80x0.1	1.13E+07	8.39E+04	0.74%
	D_10	200x80x0.1	9.60E+06	6.76E+04	0.70%
	D_11	200x80x0.5	8.12E+06	5.84E+04	0.72%
	D_12	200x80x0.5	3.57E+06	2.39E+04	0.67%
	D_13	200x80x0.5	1.63E+06	1.08E+04	0.66%
	D_14	200x80x0.5	7.91E+05	5.10E+03	0.64%
	D_15	200x80x0.5	3.57E+05	2.18E+03	0.61%
	D_16	200x80x0.5	1.56E+05	8.70E+02	0.56%
	D_17	200x80x0.5	7.41E+04	4.82E+02	0.65%
	D_18	200x80x0.5	3.18E+04	1.86E+02	0.58%

D Sonstige Quellen

Private E-Mail-Korrespondenz mit Stephen Seltzer (Autor von SHIELDOSE) zu Quelle [64]:

Betreff:
RE: SHIELDOSE2
Von:
"Seltzer, Stephen M." <s.seltzer@nist.gov>
Datum:
30.03.2011 20:12
An:
Wolfgang Mai <wolfgang.mai@unibw.de>

Wolfgang,

Again I apologize for being so long to reply. You should note that the basic calculations were made using a one-dimensional code, with the depth or thickness as the only variable (i.e., the slab was unbounded in the lateral directions). And the slab was pure aluminum. Any transformations to three-dimensional geometries was done on the basis of approximate relationships, as indicated in the papers. For the original SHIELDOSE, I considered slabs 30 g/cm² thick, to get what I thought was enough thickness for the bremsstrahlung component. Later in version 2, I went to 50 g/cm². For the primary electron component I usually subdivided the scoring regions into sub-slabs going up to about 1.2 of the csda range, to include any energy-loss straggling in the results. The response of detector materials other than Al were approximated by weighting the fluence spectra by mass energy-absorption coefficients or stopping powers; again, only approximate. (The proton results were generated analytically/numerically in the straight-ahead approximation, not by Monte Carlo).

Thus the Monte Carlo geometry was exceptionally simple: a thick slab of Al, laterally unbounded. From this all the other results, in particular the solid-sphere results you ask about, can be derived. In that case, you can assume any radius/diameter (up to some appropriate maximum) and derive results, but they will be only approximate.

I'm not sure I have answered your question satisfactorily, so please let me know if I can explain things further.

Steve