

IN-SITU-DETEKTION VON PARTIKELEINSCHLÄGEN AUF SATELLITEN MITTELS ANTENNEN

M. Schimmerohn und M. Gulde, Fraunhofer-Institut für Kurzeitdynamik,
Ernst-Mach-Institut, EMI, Eckerstr. 4, 79104 Freiburg, Deutschland

Zusammenfassung

Der Hypervelocity-Impakt von Partikeln der Orbitumgebung erzeugt eine transiente Plasmawolke auf Raumfahrtsystemen, die zur In-Situ-Detektion von Impaktereignissen genutzt werden kann. In numerischen Simulationen mit einem eigens entwickelten Modell wurde ein einfaches Detektionskonzept untersucht, das auf der Wechselwirkung des Impaktplasmas mit Antennen beruht. Es konnte gezeigt werden, dass ein Array von wenigen, zentimetergroßen Antennen auf der Außenseite eines Raumfahrzeugs ausreichend ist, um die Bedingungen des Impakts aus den induzierten Spannungssignalen abzuleiten.

1. EINLEITUNG

Raumfahrtsysteme unterliegen verschiedenen Umwelteinflüssen im Orbit, von denen der Hypervelocity-Impakt von Partikel aufgrund der wachsenden Gefährdung von Raumfahrtmissionen durch Weltraummüll zunehmende Beachtung erfährt. Aus der hohen Relativgeschwindigkeit des Partikels zur Oberfläche ergeben sich Stoßwelleneffekte, die bereits bei millimetergroßen Partikeln zu signifikanten Funktionsbeeinträchtigungen des Raumfahrtsystems führen können. Mechanische Schäden wie Krater, Perforationen und Fragmentierungen sind die offensichtlichsten Folgen des Hypervelocity Impakts. Bevor diese Effekte zum Tragen kommen, expandiert eine transiente Plasmawolke über die Oberfläche des Raumfahrtsystems. Dieses sogenannte Impaktplasma besteht aus verdampften und ionisierten Material des beim Impakt am stärksten komprimierten Materials von Partikel und getroffener Komponente. Aus der vielseitigen Wechselwirkung des Impaktplasmas mit der Oberfläche des Raumfahrzeugs können Rückschlüsse auf die Impaktbedingungen geschlossen werden. Auf einer Vielzahl von interplanetaren Raumfahrtmissionen kamen Ladungsdetektoren zur Detektion von Impaktplasma zum Einsatz (z.B. [1] - [3]). Sie extrahieren die Ladungsträger des Plasmas durch ein elektrisches Feld im Innern einer abgeschirmten Kavität. Ziel dieser großen und technisch komplexen Geräte ist vor allem die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung von Mikrometeoroiden, der natürlichen Komponente der Partikelumgebung im Orbit. Gleichzeitig manifestieren sich aber Impaktereignisse unfreiwillig als Störsignale auf Antennen von Radioastronomie- und Weltraumplasma-Experimenten. Ein Beispiel für eine solche Messung ist in BILD 1 für die Satelliten STEREO A und B gezeigt. Während beide Satelliten gleichermaßen Fluktuationen der Plasmaumgebung des Orbits messen, erfährt STEREO A Störsignale, die der Wechselwirkung von sich ausbreitenden Impaktplasmawolken mit den Antennen zugeschrieben werden [4]. Diese Beobachtung motiviert den Ansatz, Hypervelocity-Impakts direkt durch Ihre Wechselwirkung mit Antennen am Satelliten zu charakterisieren. Nach wie vor sind Weltraummüll und Mikrometeoroiden schwierig zu beobachten, was Daten und Modelle zur Verteilung und den grundlegenden Eigenschaften wie Größe, Dichte und

chemischer Zusammensetzung der Partikel mit deutlichen Ungewissheiten behaftet. In-Situ-Messdaten von Impaktereignissen auf Satelliten können nicht nur helfen das Wissen über eine der am wenigsten bekannten Komponenten der Weltraumumgebung zu verbessern, sondern auch zur Lageerfassung bei Anomalien eines Satelliten zum Einsatz kommen.

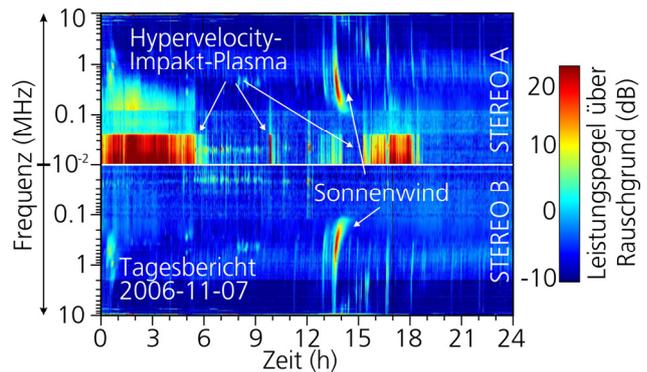


BILD 1. Impaktinduzierte Störsignale in den S/WAVE-Spektrogrammen von STEREO A nach [5].

Ob und unter welchen Voraussetzungen Antennen zur In-Situ-Detektion von Einschlägen auf Raumfahrzeugen geeignet sind, wurde am Fraunhofer EMI im Rahmen einer ESA-Studie untersucht [6]. Die Studie basiert auf numerischen Simulationen, die einen breiten Parameterbereich zulassen, der im Experiment nur limitiert und mit großem Aufwand umgesetzt werden kann. Zwei wesentlichen Fragestellungen müssen bei der Modellierung berücksichtigt werden: 1.) Wie skalieren die Eigenschaften der Plasmawolke mit der Größe und der Impaktgeschwindigkeit des Partikels und 2.) Welche messbaren Korrelationen bestehen zwischen den in der Antenne erzeugten Signalen und der Plasmawolke?

2. IMPAKTPLASMA

Das Impaktplasma ist das Resultat der extremen Druck- und Temperaturbedingungen, die beim Aufschlag des Partikels auf die Oberfläche eines Satelliten entstehen. Durch Stoßwelleneffekte wird Material des Partikels und der getroffenen Oberfläche derart komprimiert, dass es bei

der anschließenden Entlastung Phasenwechsel zum gasförmigen und dem Plasma-Zustand erfährt. Das entstehende ionisierte Gasgemisch expandiert rasch über die Oberfläche des Satelliten, wobei es sehr schnell an Dichte und Temperatur verliert.

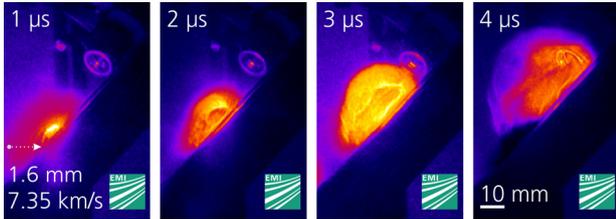


BILD 2. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Ausbreitung einer Impactplasmawolke.

BILD 2 zeigt experimentelle Beobachtungen der sich ausbreitenden Plasmawolke kurz nach dem Impact, wenn die dichte Plasmawolke noch selbstleuchtend ist.

2.1. Modellierung

Zur quantitativen Beschreibung des Impactplasmas greifen wir auf das Modell von Drapatz und Michel [7] zurück, welches wir mit verschiedenen Ansätzen aus Impact-, Plasma- und Laserphysik kombinieren und dabei bevorzugt semi-empirische Ansätze nutzen. Der Ausgangspunkt unseres Modells (das wir an anderer Stelle im Detail publizieren) ist die Simulation der Zustandsänderung bei der Stoßbelastung für gegebene Impactbedingungen (Größe, Material und Relativgeschwindigkeit der kollidierenden Komponenten). Sie bestimmt die Menge und den Zustand der entstehenden Plasmawolke. Dessen Änderung während der Expansion verfolgen wir mit einem selbstständigen Ansatz, um die Temperatur, die Dichte und den Ionisationsgrad der Wolke zu bestimmen. Beispielhaft ist in BILD 3 die Zusammensetzung einer expandierenden Plasmawolke gezeigt.

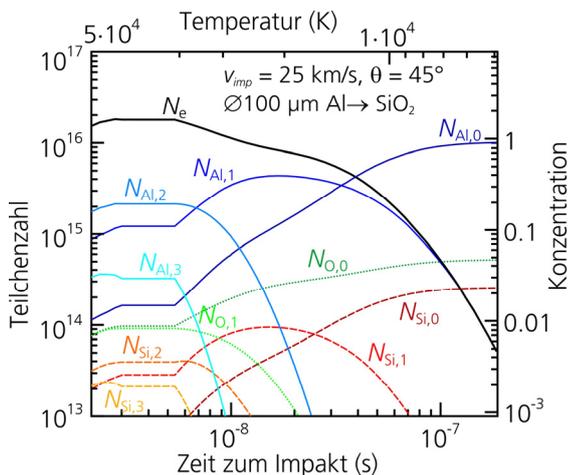


BILD 3. Gleichgewichtszusammensetzung einer Impactplasmawolke, die aus dem 25 km/s-Impact einer 100 µm Aluminium-Kugel auf eine Quarzfläche resultiert.

Das Modell erlaubt die vollständige Beschreibung der Eigenschaften einer Impactplasmawolke aus den ursprünglichen Impactbedingungen. Für niedrige Impactgeschwindigkeiten steigt allerdings die Ungenauigkeit, da

hier die beschriebene thermale Ionisierung aus der Stoßwelle nicht mehr der dominante Effekt ist, sondern verschiedene Oberflächenprozesse das Erreichen des Plasmazustands bewirken. Weitere experimentelle Untersuchungen des Impactplasmas für diesen experimentell gut zugänglichen Bereich sind vorgesehen.

2.2. Charakteristik

Das Impactplasmamodel wurde in einer parametrischen Studie angewendet, um die Abhängigkeiten der Wolkeigenschaften von den Impactbedingungen zu untersuchen. Die Simulationen erfolgten für Kombinationen des Impacts der Materialien Quarz, Aluminium, Eisen und Gold. Der Einfluss des Materials ergab sich allerdings als nicht besonders ausgeprägt gegenüber den rapiden Änderungen während der Expansion. Es lässt sich daher aus den Auswertungen der Plasmasimulationen schließen, dass das Konzept der antennenbasierten Detektion des Impactplasmas für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Partikel nicht geeignet ist. Andererseits bleibt so der Einfluss der Parameter Partikelgröße und Impactgeschwindigkeit gut nachvollziehbar. BILD 4 zeigt die Elektronendichte in Abhängigkeit dieser Parameter für schräge Quarz-Gold-Impacts für eine Wolkengröße von 20 cm. Der Anstieg der Elektronendichte für größere Partikel folgt aus der Skalierung der Impactgeometrie. Auch die für höhere Impactgeschwindigkeiten größeren Stoßlasten erhöhen den Anteil der erzeugten Ladungsträger, stagnieren aber für Geschwindigkeiten > 40 km/s, da der Partikel vollständig ionisiert und höhere Lasten hier kaum zu einer Erhöhung der Ionisierung beitragen. Die in BILD 4 gezeigten Isokonturen repräsentieren die Fluenz von Mikrometeoroiden. Sie sollen die Häufigkeit verdeutlichen, mit der die Parameterkombinationen im Orbit vorkommen.

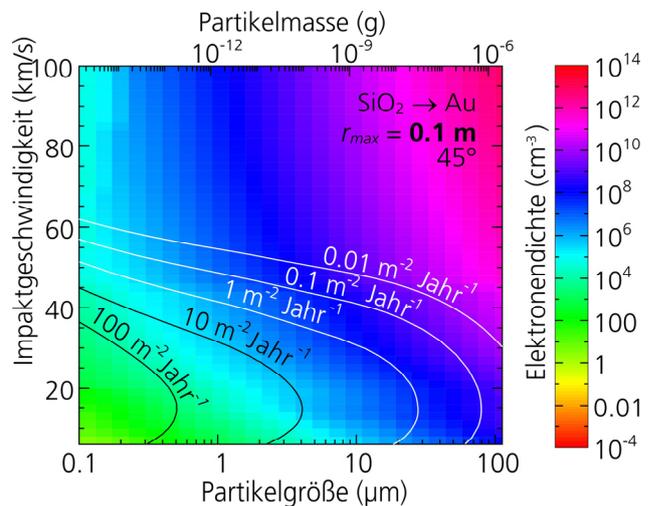


BILD 4. Elektronendichte in Abhängigkeit von Impactgeschwindigkeit und Partikelgröße für eine auf 20 cm expandierte Impactplasmawolke.

Die gezeigte Dichteverteilung im m - v -Parameterraum bleibt während der Expansion erhalten¹. Das liegt vorrangig an einem von der Partikelgröße nahezu

¹ Eine Ausnahme existiert für sehr kleine Partikel im unteren µm-Bereich, deren Plasmawolken sehr früh und mit einer höheren Ionisation aus dem chemischen Gleichgewicht fallen und dann kollisionsfrei expandieren.

unabhängigen Beziehung zwischen der Impactgeschwindigkeit des Partikels und der Expansionsgeschwindigkeit der Wolke. Während Erstere die Menge der beim Impact freigesetzten thermischen Energie bestimmt, wird Letztere durch den thermalen Druck der Wolke getrieben. Neben dieser radialen Expansionskomponente weist die Impactplasmawolke noch eine zweite, zur Oberfläche horizontale Komponente auf. Diese ist in BILD 2 als Aufwärtsbewegung der gesamten Wolke entlang der Oberfläche erkennbar und resultiert aus der Geometrie des schrägen Impakts. Damit kann eine hinreichende Anzahl von untereinander unabhängigen Korrelationen der Impactparameter Geschwindigkeit, Winkel und Partikelgröße aus der Dichte der expandierenden Plasmawolke abgeleitet werden.

3. ANTENNENSIGNALE

Im untersuchten Konzept werden die Impactparameter aus den Wechselwirkungen der auf der Satellitenoberfläche expandierenden Plasmawolke mit einer Antenne zurückverfolgt. Dabei ist der Begriff der Antenne, der von den einleitend beschriebenen Störsignalen inspiriert ist, physikalisch gesehen nicht eindeutig zutreffend ist, da keine Radiosignale, sondern direkte oder indirekte Wechselwirkungen von Ladungsträgern des Plasmas gemessen werden. Letztlich wird das Antennenpotential durch die Anwesenheit der freien Ladungsträger gegenüber seinem Ausgangszustand geändert. Vier verschiedene physikalische Mechanismen wurden dabei für die Untersuchung berücksichtigt:

- V1) Die direkte Detektion der freien Ladungsträger im Impactplasma, wenn dieses die Antenne während der Expansion überstreift.
- V2) Die indirekte Detektion der Ladungsträger durch die Ansammlung von freien Ladungsträgern auf der geladenen Satellitenoberfläche. Dieser Prozess wurde von Oberc [8] für die beobachteten Störsignale vorgeschlagen. Der Satellit sammelt durch sein Oberflächenpotential Elektronen des Impactplasmas ab und ändert sein Potential relativ zur Antenne.
- V3) Die Störung des Gleichgewichtspotentials der Antenne durch die Beeinflussung des Photoelektronenstroms durch die Plasmawolke. Pantellini et al. [9] schlagen diesen Mechanismus für das oben genannte STEREO-Beispiel vor.
- V4) Die Emission von Sekundärelektronen durch die Wechselwirkung der Ionen der schnell expandierenden Wolke auf der Antennenoberfläche.

Der letztgenannte Effekt blieb in bisherigen Diskussionen unberücksichtigt. Experimentelle Beobachtungen am Fraunhofer EMI zeigen aber, dass die Ionen wegen der hohen Expansionsgeschwindigkeit relativ zur Antenne deutliche Wechselwirkungen erzeugen.

3.1. Simulation

Das Impactplasmamodell wurde für die Simulation der Antennensignale erweitert. Eine relativ zum Impactort platzierte Antennenoberfläche erfährt einen der Expansion und dem Dichteprofil der Plasmawolke entsprechenden Fluss an Ladungsträgern. In BILD 5 ist das für fünf

verschiedene Expansionsstadien gezeigt.

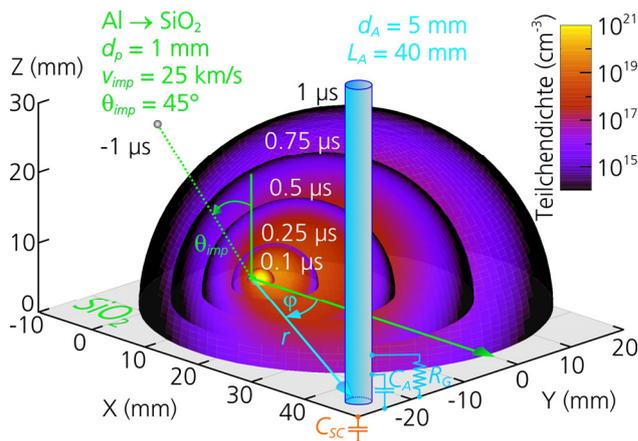


BILD 5. Simulation der Plasmawolke und der Antennensignale für exemplarische Parameter des Impakts (grün) und der Antenne (blau) zu verschiedenen Zeitpunkten.

Neben Position und Dimension der Antenne muss für die Simulation der Antennenantwort auch das Potential der Antenne und des Satelliten berücksichtigt werden. Beide ergeben sich aus der Wechselwirkung mit der Plasmumgebung des Orbits und werden als konstant angenommen, da die Expansion des Impactplasmas auf einer wesentlich kürzeren Zeitskala als die Einstellung des elektrostatischen Gleichgewichts vorstättengeht.

3.2. Ergebnisse

Von den vier untersuchten Mechanismen erwiesen sich die Sekundärelektronenemission (V4) und die indirekte Wiederansammlung der Elektronen auf dem Satelliten (V2) als die geeignetsten Methoden zur Detektion mittels einer Antenne. Wie BILD 6 beispielhaft zeigt, sind die detektierten Spannungsamplituden für die direkte Detektion (V1) zu gering. Schließlich wird nur die Nettosumme der Ladungen registriert. Die Impactplasmen für relevante Partikelgrößen expandieren im stoßdominierten Regime, weshalb sich eine Differenz nur durch das Absammeln der Ladungsträger durch das Satellitenpotential einstellt. Die aus dem Impactplasma kleinerer μm -Partikel entstehenden stoßfreien Plasmawolken weisen zwar Ladungsträgertrennungen auf, aber die erzeugte Gasmenge ist zu gering für nennenswerte Spannungsanstiege.

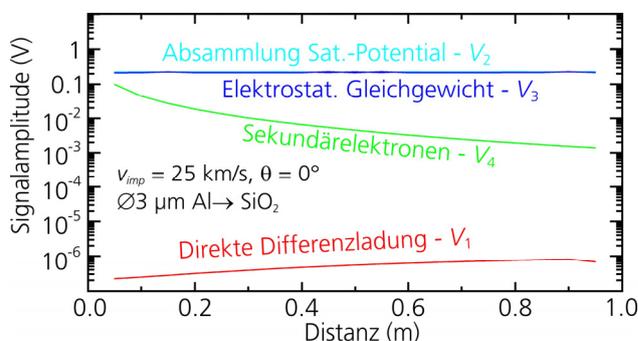


BILD 6. Absolute Spannungsamplituden der vier Detektions-Mechanismen in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Impactort und Antenne.

Der Effekt durch die Beeinflussung des Antennengleichgewichts (V3) erweist sich aufgrund der starken Empfindlichkeit in Bezug auf die momentane Ausrichtung der Einschlagoberfläche relativ zur Sonne als uneindeutig.

Die direkte Erzeugung von Sekundärelektronen durch den Impact der schnellen Ionen der Plasmawolke auf der Antennenoberfläche (V4) ist der vielversprechendste Effekt, der sowohl gut messbare Amplituden als auch konsistente Parameterkorrelationen zur Position und Dimension der Antenne aufweist. Letzteres erlaubt das Heranziehen des Signalverlaufs zur Bestimmung der Impactparameter. Ein charakteristischer Signalverlauf, wie in BILD 8 gezeigt, besteht aus einem schnellen Anstieg und einem langsameren Abfall, der der Charakteristik für die Wiederherstellung des elektrostatischen Gleichgewichts folgt. Beide Eigenschaften sind von der Position der Antenne zum Impact abhängig. BILD 7 zeigt die Abhängigkeit der Anstiegszeit von der Position der Antenne in polaren Koordinaten.

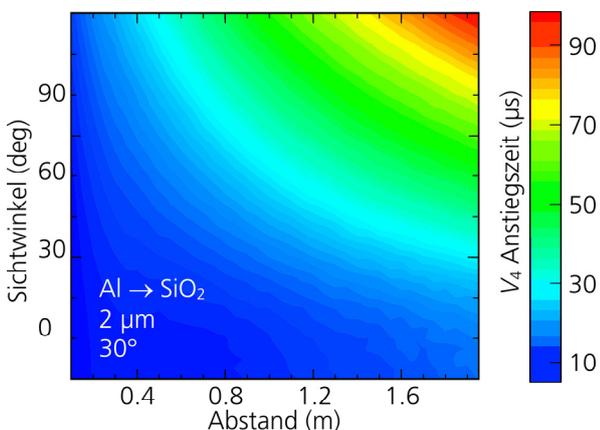


BILD 7. Signalanstiegszeit als Funktion der Antennenposition für den Impact eines 2 μm Al-Partikels auf Quarz mit 25 km/s unter 30°

Die Anstiegszeit ist für größere Entfernungen zur Antenne größer, da die stärker expandierte Wolke die Antenne für eine längere Zeit überstreift. Für schräge Impacts kommt zudem der Einfluss der horizontalen Geschwindigkeitskomponente hinzu. Um diesen zu extrahieren, ist die Messung mit mehreren Antennen notwendig. Eine zusätzliche Referenz kann auch das Signal des veränderten Satellitenpotentials (V2) geben, das auch von Antennen gemessen wird, die nicht direkt mit der Impactplasmawolke wechselwirken und unabhängig von der Antennenposition ist.

4. DETEKTIONSKONZEPT

Auf der Grundlage der in den Simulationen gefundenen Parameterkorrelationen kann ein einfaches und robustes Detektionskonzept abgeleitet werden. Zum Nachweis der Machbarkeit und zur Identifizierung einer optimalen Konfiguration, haben wir exemplarische Fallbeispiele simuliert. Das Ergebnis einer solchen Optimierung ist in BILD 8 gegeben. Der Detektor besteht aus einem hexagonalen Array von sieben passiven Antennen von 30 cm Länge und 1 cm Durchmesser. Der Abstand zwischen den Antennen beträgt 30 cm. Aus den gemessenen Antennensignalen kann mittels Triangulation und einfachen Fitfunktionen die Informationen des Impacts

zurückverfolgt werden. Im gezeigten Beispiel konnte der Impactort mit einer Abweichung von weniger als 5 % und der Impactwinkel und die Partikelmasse mit einer Abweichung kleiner als 15 % bestimmt werden.

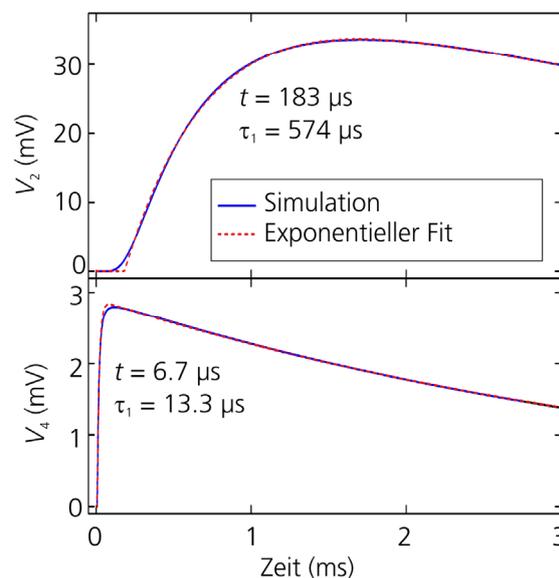
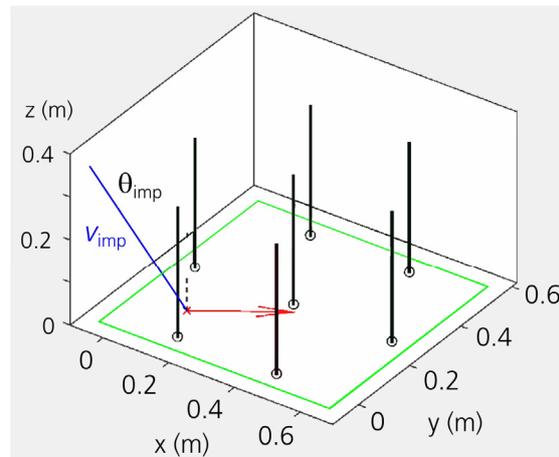


BILD 8. Detektionskonzept und Beispiel eines simulierten und gefitteten Antennensignals.

Der Aufbau des Detektors ist vergleichsweise einfach. Neben den Antennen mit Standardverdrahtung bedarf es einer planen, mindestens 1 mm dicken Oberfläche eines homogenen Materials als Impactoberfläche. Auch die Anforderungen an die Auswertelektronik ist z.B. mit moderner FPGA-Technologie realisierbar: Die Signale müssen mit einer Rate von 0.1 μs und einer Signalauflösung von 0.01 mV abgetastet werden, die maximalen Amplituden liegen für Partikel <100 μm bei maximal 5 V. Zur Messung des Satellitenpotentials ist ein Spannungsdetektor notwendig, für die es nach dem derzeitigen Stand der Technik kompakte und flugerprobte Lösungen gibt. Des Weiteren kann komplementäre Impactdiagnostik (z.B. Penetrationsdetektoren oder Mikrophone) wichtige Referenzinformationen liefern. Um das Konzept zu einem kompakten, für vielfältige Raumfahrtmissionen geeigneten flugreifen Instrument zu entwickeln, sind moderate technische Implementierungsarbeiten gefordert. Als nächster Schritt sind insbesondere eine experimentelle Verifikation des Detektionskonzepts und die numerische Simulation des Ladungszustandes des Satelliten im

Wechselspiel mit den Störungen durch das Impaktplasma angebracht.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Wir haben ein relativ einfaches und robustes Konzept zur antennenbasierten In-Situ Detektion des Hypervelocity-Impakts von Mikrometeoroiden und Weltraummüllpartikeln untersucht. Numerische Simulation der Wechselwirkung von beim Hypervelocity-Impakt erzeugten Plasmawolken mit einem Array von zentimetergroßen Antennen zeigen, dass Impaktparameter wie Partikelgröße sowie Geschwindigkeit und Winkel des Impakts aus den gemessenen Spannungssignaturen bestimmt werden können. Der entscheidende Vorteil dieses Detektionskonzepts, das eine äußere Oberfläche des Raumfahrzeugs als Detektionsfläche nutzt, ist seine Einfachheit. Als kompaktes Messsystem kann es zur direkten und effizienten Erforschung einer der am wenigsten bekannten Komponenten der Weltraumumgebung dienen.

6. DANKSAGUNG

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des im ESA General Studies Programme unter der Vertragsnummer 4000107623/13/NL/AF gefördert. Wir danken dem Projektbetreuer Alain Hilgers.

7. QUELLEN

- [1] Dietzel, H., Eichhorn, G., Fechtig, H. et al. (1973). The HEOS 2 and HELIOS Micrometeoroid Experiments. *J. Phys. E – Sci. Instr.* 6, 209-217.
- [2] Göller, J.R., Grün, E. & Maas, D. (1987). Calibration of the DIDSY-IPM Dust Detector and Application to other Impact Ionisation Detectors on board the P/Halley Probes. *Astron. Astrophys.* 187, 693-698.
- [3] Srama, R., Ahrens, T.J., Altobelli, N. et al. (2004). The CASSINI Cosmic Dust Analyzer. *Space Sci. Rev.* 114, 465-518.
- [4] Meyer-Vernet, N. & Zaslavsky, A. (2012). In Situ Detection of Interplanetary and Jovian Nanodust with Radio and Plasma Wave Instruments. In *Nanodust in the solar system: discoveries and interpretations* (Eds. I. Mann et al.), Springer, 133-160.
- [5] Kaiser, M. (2013): Data Plots for STEREO-WAVES and other Instruments. <http://swaves.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/wimp.p>.
- [6] Schimmerohn, M. (2015). Detection of Microparticle Impacts on Spacecraft via their Plasma Effects. EMI-Bericht I-50/15, Final Report ESA contract 4000107623/13/NL/AF, Oktober 2015.
- [7] Drapatz, S. & Michel, K.W. (1974). Theory of Shock-Wave Ionization upon High-Velocity Impact of Micrometeorites. *Z. Naturforsch. A*) 29, 870-879.
- [8] Oberc, P. (1996). Electric Antenna as a Dust Detector. *Adv. Space Res.* 17(12), 105-110.
- [9] Pantellini F, Belheouane, S., Meyer-Vernet, N. & Zaslavsky, A. (2012). Nano Dust Impacts on Spacecraft and Boom Antenna Charging. *Astrophys. Space Sci.* 341, 309–314.