

MÖGLICHER KÜHLMITTELAUSTRITT AUS EINEM ORBITALEN TOPAZ REAKTOR AN BORD VON COSMOS 1818

C. Wiedemann¹, S. Flegel¹, J. Gelhaus¹, M. Möckel¹, H. Klinkrad², H. Krag²,
P. Vörsmann¹

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

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

ÜBERSICHT

Im Juli 2008 kam es in ca. 800-900 km Höhe zu einem orbitalen Freisetzungseignis, das mit großer Wahrscheinlichkeit als Kühlmittelaustritt eingestuft werden kann. Das Ereignis wurde durch den Satelliten Cosmos 1818 verursacht, der einen abgeschalteten Kernreaktor an Bord hat. Der Reaktor gehört zum Typ TOPAZ und ist seit 1987 außer Betrieb. Der Satellit ist derzeit auf einem ausreichend hohen Orbit, wo er für mehrere Jahrhunderte verbleiben wird, um einen Zerfall der Radioaktivität auf ein akzeptables Niveau zu erlauben. Nach amerikanischen Beobachtungen hat der Satellit eine Reihe von kleinen Objekten freigesetzt. Aufgrund der geringen zusätzlichen Geschwindigkeit dieser Objekte ist diese Freisetzung ein niedrigerenergetisches Ereignis. Es wird davon ausgegangen, dass die Objekte Natrium-Kalium (NaK) Tropfen aus dem Kühlsystem des Reaktors sind. Wenn es sich bei den Objekten tatsächlich um NaK-Tropfen handelt, dann ist dies der erste dokumentierte Fall, der nicht einem Buk Reaktor zugeordnet werden kann. Einige der Buk Reaktoren, die an Bord der Satelliten des Typs RORSAT eingesetzt wurden, haben in der Vergangenheit operationell ihren Reaktorkern abgestoßen und dabei den primären Kühlkreislauf geöffnet. Es hat wahrscheinlich 16 Ereignisse dieser Art bis Ende der achtziger Jahre gegeben, bei denen NaK-Tropfen freigesetzt worden sind. Diese Tropfen tragen heute zu etwa 30 Prozent zur Weltraummüllpopulation in 900 km Höhe im Zentimeterbereich bei. Im Vergleich dazu waren die TOPAZ Reaktoren nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht für ein solches operationelles Verfahren ausgelegt. Daher wurde ein Kühlmittelaustritt für einen TOPAZ Reaktor nicht erwartet. In dieser Arbeit wird der Beitrag des NaK Austrittseignisses, das möglicherweise durch den TOPAZ Reaktor verursacht wurde, zur bereits bestehenden Population von orbitalen Flüssigmetalltropfen untersucht. Es wird ein Modell für die Beschreibung des Austritts entwickelt, einschließlich der Schätzung der wichtigsten Parameter. Diese Parameter sind die freigesetzte Masse an flüssigem Metall, die Größenverteilung und Anzahl der Tropfen sowie die Austrittsgeschwindigkeit und -Richtung der Tropfen. Das Austrittseignis wird simuliert. Die orbitale Verteilung wird als räumliche Dichte dargestellt. Darüber hinaus wird der Beitrag der NaK-Tropfen zur gesamten Weltraummüllpopulation bestimmt.

1. EINLEITUNG

Im vom Orbital Debris Program Office des NASA Johnson Space Center herausgegebenen Orbital Debris Quarterly News wurde Anfang 2009 über ein ungewöhnliches Weltraummüll-Freisetzungseignis berichtet [12]. Ein seit

1987 abgeschalteter Kernreaktor an Bord des Satelliten Cosmos 1818 verursachte eine unerwartete Trümmervolke. Mehrere kleine Partikel wurden bei dem noch ungeklärten Erzeugungsereignis freigesetzt. Das Ereignis hat etwa am 4. Juli 2008 stattgefunden. Für über 30 kleine Objekte konnten Bahndaten durch das US Space Surveillance Network bestimmt werden. Die meisten der Objekte sind in Flugrichtung des Satelliten ausgetreten. Die Austrittsgeschwindigkeiten waren sehr niedrig und betrugen weniger als 15 m/s. Es handelt sich demnach um ein niedrigerenergetisches Ereignis. Die Radarbeobachtungen haben gezeigt, dass zusätzlich eine große Anzahl von sehr kleinen Objekten freigesetzt wurde. Spezielle Beobachtungen lassen darauf schließen, dass die Objekte metallische Kugeln sind. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass es sich bei den Objekten um kugelförmige Natrium-Kalium-Tropfen (NaK) aus dem Kühlsystem des Reaktors handelt. In [12] wird angenommen, dass sich das Kühlmittel an Bord von Cosmos 1818 generell in einen gefrorenen Zustand befindet. Es wird aber vermutet, dass einige der Rohre im Radiator sich im Sonnenlicht soweit erwärmen können, dass das Kühlmittel vorübergehend flüssig werden kann. Ein Bruch eines Rohres könnte die Ursache für den Kühlmittelaustritt gewesen sein. Eine andere Möglichkeit könnte nach [12] darin bestehen, dass ein Hochgeschwindigkeitseinschlag eines kleinen Partikels genügend Wärme freigesetzt hat, um einen Teil des NaK aufzuschmelzen.

1.1. Der TOPAZ Reaktor

Im folgenden soll eine Übersicht über den bisherigen Kenntnisstand bezüglich des Reaktordesigns gegeben werden. Die Arbeiten am Reaktor begann unter dem Namen Topol. Der Name TOPAZ wurde später dem System gegeben. TOPAZ ist eine Abkürzung, die das Gerät als experimentell beschreibt mit einer thermionischen Energieumwandlung innerhalb des Reaktorkerns. Zwei TOPAZ Reaktoren wurden erfolgreich auf einer Umlaufbahn in den Jahren 1987-1988 getestet. Diese beiden TOPAZ Reaktoren waren Prototypen. Sie wurden innerhalb der Cosmos-Serie gestartet. Das Hauptziel der Tests war es, die Einsatzbereitschaft eines thermionischen Reaktors im Weltraum zu untersuchen. Das Erreichen einer langen Betriebsdauer ist während der Testflüge nicht untersucht worden. Die erste Inbetriebnahme eines TOPAZ Reaktors im Weltraum erfolgte am 2. Februar 1987 an Bord des Satelliten Cosmos 1818 (Orbital-Höhe: 810/970 km). Der zweite TOPAZ Reaktor wurde am 10. Juli 1987 an Bord des Satelliten Cosmos 1867 eingesetzt (Orbital-Höhe: 797/813 km). Die Länge des Reaktors TOPAZ beträgt 4,7 m. Der maximale Durchmesser liegt bei 1,3 m und seine Masse bei etwa 1,2 t (ohne Batterien). Die Fläche des Radiators beträgt ca. 7 m². Der Reaktor hat einen

einzigsten Kühlkreislauf und verwendet die eutektische Legierung von Natrium und Kalium als Kühlmittel. Der Reaktor wurde so ausgelegt, dass er in einer so ausreichenden hohen Bahnhöhe betrieben wird, die nach dem Abschalten auch als Friedhofsumlaufbahn dient. Nach der Abschaltung des Reaktors wird der Satellit für mehr als 350 Jahren in dieser Umlaufbahn bleiben. Diese Zeit wird als ausreichend angesehen, um den radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte sowie der wichtigsten Nebenprodukte zu ermöglichen [3,4,7].

1.1.1. Der Kühlmittelkreislauf

Das Kühlmittel tritt durch drei Rohre in die Verteilerleitung des Radiators. Es verlässt die Sammelleitung ebenfalls durch drei Rohre und wird von einer elektromagnetischen Pumpe in den Reaktor geleitet. Die Rohre (sowie die elektrischen Leitungen) laufen durch Aussparungen in der äußeren Oberfläche der Strahlungsschirms. Die Verteiler- und Sammelleitung des Radiators, stehen durch eine Vielzahl hydraulisch verbundener, paralleler Röhren (die einen D-förmigen Querschnitt haben) miteinander in Verbindung. Die flache Seite dieser Röhren ist an eine Stahlhülle gelötet, die eine Emission von 0,85 aufweist [3]. Die eutektische Schmelze des Kühlmittels (NaK-78) hat eine Erstarrungstemperatur von etwa 262 K. Dies erlaubt den Verzicht auf spezielle Vorrichtungen für das Schmelzen der Legierung vor der Inbetriebnahme des Reaktors im Weltraum. Dennoch muss ein Gefrieren des Kühlmittels beim Start des Reaktors in seine operationelle Umlaufbahn verhindert werden. Vor dem Start wird das Kühlmittel auf etwa 350 K vorgewärmt. Dazu sind Elektroheizgeräte in Flüssigmetallkühlkreislauf installiert worden. Während des Vorwärmens wird das Kühlmittel mit der elektromagnetischen Pumpe bei niedriger Umwälzgeschwindigkeit gepumpt (angetrieben durch eine bodengestützte Energieversorgung). Darüber hinaus deckt eine Vakuum-Thermalisolation einen bestimmten Bereich der Oberfläche des Radiators ab. Diese Isolierung wird vor dem Hochfahren des Reaktors entfernt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Kühlflüssigkeit während der Startphase bis zur Inbetriebnahme des Reaktors im Orbit flüssig bleibt [1,15].

1.1.2. Der Reaktorkern

Die Strom erzeugenden Elemente haben eine zylindrische Form und enthalten Urandioxid mit angereichertes Uran-235 als Kernbrennstoff. Der Kernbrennstoff ist in der Mitte angeordnet und ist durch eine Molybdän- oder Wolfram-Kathode umgeben. Diese Kathode wird durch einen dickwandigen Zylinder aus einer Niob-Legierungen umschlossen, die als Anode dient. Der zwischen Kathode und Anode befindliche Spalt ist mit Cäsium-Dampf gefüllt. Fünf dieser Strom erzeugenden Elemente sind seriell zu einem Strang verbunden. Dieser Strang ist durch eine elektrische Hochtemperatur-Isolation umgeben und wird in einen zylindrischen Stahlrohr untergebracht. Der TOPAZ Reaktor arbeitet mit einem thermischen Neutronen-Spektrum unter Verwendung eines Moderators aus Zirkoniumhydrid. Der darin enthaltene Wasserstoff ist eine der wirksamsten Substanzen zur Moderierung von Neutronen. Das Zirkoniumhydrid ermöglicht es, im Moderator eine sehr hohe spezifischen Dichte der Wasserstoffkernen mit einer hohen Betriebstemperatur (ca. 600 °C) zu kombinieren. Der Reaktorkern ist von einem Beryllium-Reflektor umgeben. Beryllium ist das wirksamste Neutro-

nen reflektierenden Material. Der seitlichen Reflektor besteht aus 12 rotierenden Beryllium-Zylindern, um den Reaktor zu steuern. Abschnitte dieser Zylinder sind mit Neutronen absorbierenden Platten aus Borkarbid bedeckt. Eine Rotation eines solchen Zylinders mit seiner Bor beschichteten Seite in den Reaktorkern, erhöht die Absorption von Neutronen, so dass die Reaktorleistung sinkt [14].

1.1.3. Thermionische Energiewandlung

Das Prinzip der thermionischen Energieumwandlung funktioniert wie ein Vakuum-Diode (vergleichbar mit einem Radio-Röhre). Eine metallische Elektrode der Diode wird als Elektronen-Emitter (Kathode) verwendet, indem sie auf eine hohe Temperatur erhitzt wird und dadurch Elektronen emittiert. Hinreichend energiereiche Elektronen kondensieren auf den Kollektor (Anode des Wandlers) und verrichten dadurch Arbeit in einem extern geschlossenen Stromkreislauf zwischen Emitter und Kollektor [14]. Cäsium-Dampf wird in den Spalt zwischen die Elektroden geleitet, wo er ionisiert wird. Die erzeugten positiven Caesium-Ionen gleichen die negative Raumladung der emittierten Elektronen aus. Dies ermöglicht den Fluss eines elektrischen Stroms und damit die Erzeugung von elektrischer Leistung [7]. Molybdän wurde als Material für die Ummantelung des Emitters beim ersten Prototypen (Cosmos 1818) gewählt. Der zweite Prototyp (Cosmos 1867) verwendet eine Kombination dieser Beschichtung mit Wolfram. Die Gesamtmasse des Cäsiums, das in den Verdampfer gespeist wird, beträgt ca. 2,5 kg. Mit einem Durchsatz von 6 bis 20 g pro Tag, war dieser Cäsiumvorrat der begrenzendende Faktor für die Lebensdauer der Reaktor-Prototypen. Der erste Prototyp verbraucht seine Cäsium-Vorrat nach 143 Tagen und der zweite Prototyp nach 342 Tagen. Der Unterschied in der Betriebsdauer zwischen dem ersten und zweiten Prototyp ist ausschließlich auf den unterschiedlichen Verbrauch von Cäsium zurückzuführen. Die verbesserte Ummantelung des Emitters des zweiten Prototypen erlaubte einen Betrieb bei niedrigerem Druck des Cäsium-Dampfes [4]. Beim zweiten Prototypen war der optimale Cäsium-Dampfdruck nur halb so hoch wie beim ersten, was zu unterschiedlichen Cäsium-Verbrauch führte und damit zu unterschiedlichen Betriebszeiten [14].

1.2. Historische NaK Austrittsereignisse

Flüssigmetalltropfen sind bereits zuvor beim Einsatz anderer Kernreaktoren in den 1980er Jahren freigesetzt worden [5,11,16]. Die Natrium-Kalium-Flüssigmetalltropfen, die aus orbitalen Kernreaktoren ausgetreten sind, werden in der Literatur üblicherweise als "NaK-Tropfen" (NaK Droplets) bezeichnet. Diese älteren Reaktoren mit der russischen Bezeichnung "Buk" wurden zur operationellen Erzeugung elektrischer Leistung an Bord von Radar-Ozeanüberwachungssatelliten des Typs RORSAT eingesetzt.

Die Ozeanüberwachungssatelliten des Typs RORSAT arbeiteten in Umlaufbahnen nahe 250 km Bahnhöhe. Nach dem Ende ihres Betriebes wurden die Reaktoren meistens auf höhere Umlaufbahnen zwischen 900 km bis 950 km Bahnhöhe gebracht, um dort zu verbleiben. Diese Friedhofsumlaufbahn wird als Sufficiently High Orbit (SHO) bezeichnet und dient dazu, ein Abklingen der Radioaktivität zu erlauben, bevor die Reaktoren in einigen

Jahrhunderten in die Erdatmosphäre wiedereintreten. Nach Erreichen dieses Orbits öffnete sich der Reaktorbehälter und stieß den Reaktorkern, bestehend aus einem kleinen Paket von 37 Uranbrennstäben, in den Weltraum hinaus. Für 13 Reaktoren ist die Kernabstoßung nachgewiesen. Es wird davon ausgegangen, dass insgesamt 16 Kernabstoßungen stattgefunden haben. Die mit der Reaktorkernabstoßung verbundene Öffnung des Reaktorbehälters hatte zur Folge, dass auch der primäre Kühlkreislauf geöffnet wurde. Der Reaktorbehälter und der Kühlkreislauf stehen unter Druck, der sich bei der Öffnung des Behälters vermutlich schlagartig abbaut. Die darin enthaltene Kühlflüssigkeit, eine eutektische Natrium-Kalium-Flüssigmetalllegierung (NaK-78), konnte durch diesen Vorgang in den Weltraum entweichen. Es entstanden kugelförmige Tropfen, die sich noch heute im All befinden. NaK-Tropfen aus den primären Kühlkreisläufen der Buk-Reaktoren sind nur zwischen 1980 und 1988 freigesetzt worden. Mit der Einstellung des RORSAT-Programms endete die operationelle Freisetzung weiterer Tropfen.

Der Buk-Reaktor ist ein schneller Neutronen-Reaktor mit einer thermischen Leistung von 100 kW. Die elektrische Leistung ist relativ gering und erreicht bis zu 3 kW. Das Kühlsystem umfasst zwei getrennte Kreise, die jeweils NaK-78 enthalten. Die NaK-Masse des primären Kühlkreislaufes beträgt 13 kg. Nach russischen Angaben werden während der Kernabstoßung 3,5 kg NaK-78 freigesetzt. Die Dichtigkeit des Sekundärkreises bleibt nach der Kernabstoßung erhalten.

Es wurde eine NaK-Austrittsmodell für diese 16 historischen Ereignisse entwickelt [16]. Das Modell leitet seine Parameter aus den Betriebsbedingungen und dem Design des Reaktors ab. Das Modell hat den Vorteil, dass es auf einer geringen Parameterzahl beruht und relativ einfach variiert werden kann. Das NaK-Austrittsmodell umfasst eine Größen-, Geschwindigkeits- und Richtungsverteilung für die austretenden Tropfen. Der Austritt von NaK aus einem TOPAZ Reaktor ist ein neues Phänomen, dass durch die bisherigen Modelle nicht beschrieben wird.

2. KÜHLMITTELAUSTRITT

Eine Leckage aus einem stillgelegten TOPAZ Reaktor ist möglich, wenn sich das Kühlmittel im flüssigen Zustand befindet. Der physikalische Zustand hängt von der Temperatur im Kühlkreislauf zum Zeitpunkt der Leckage ab. Diese Temperatur ist nicht bekannt. Für eine ungefähre Schätzung der Temperatur kann eine Analogie zu den Buk Reaktor verwendet werden. Berechnungen der Temperatur des Kühlmittels im geschlossenen zweiten Kühlkreislauf für einen stillgelegten Buk Reaktor wurden von Grinberg et al. durchgeführt [6].

2.1. Thermischer Zustand des Kühlmittels

Grundsätzlich ist es sinnvoll, zu unterstellen, dass die Konstrukteure eines Reaktors bestrebt sind, das Kühlsystem so auszulegen, dass das Kühlmittel nicht gefrieren kann. Allerdings weist die Tatsache, dass das Kühlmittel vor dem Start vorgewärmt werden muss und Teile des Radiators mit Thermalisolation geschützt werden, darauf hin, dass ein Gefrieren im abgeschalteten Zustand nicht ausgeschlossen werden kann. In [12] wird sogar davon ausgegangen, dass das Kühlmittel generell gefroren ist. Trotzdem war bei Cosmos 1818 offensichtlich ein erhebli-

cher Teil des Kühlmittels erwärmt. Sonst wäre keine Leckage erfolgt.

Die Temperatur hängt von den optischen Eigenschaften der Oberfläche des Radiators ab. Die optischen Eigenschaften haben einen signifikanten Einfluss auf die Temperatur. Die Temperatur ist abhängig von der solaren Absorption α und der infraroten Emission ε . Zahlreiche veröffentlichte Fotos zeigen, dass der TOPAZ Radiator offensichtlich mit schwarzer Farbe beschichtet ist. Nach [3] hat diese Beschichtung eine infraroten Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,85$. Der solare Absorptionskoeffizient ist nicht bekannt. Bei schwarzer Farbe dürfte er aber typischerweise bei $\alpha = 0,95$ liegen [8]. Das Absorptions-zu-Emissions-Verhältnis hätte dann einen Wert von $\alpha/\varepsilon = 1,1$. Nun ist der Reaktor seit über zwei Jahrzehnten im All. Die Oberflächenbeschichtung ist zahlreichen Oberflächenalterungsprozessen ausgesetzt.

Die grundsätzlichen Ursachen bei der Oberflächenalterung bestehen in atomaren Sauerstoff, thermischer Wechselbeanspruchung und ultravioletter Strahlung. Ein weiterer Mechanismus sind die Einschläge von Mikrometeoriten und Weltraummüll-Partikeln auf Oberflächen von Raumfahrzeuge. Atomarer Sauerstoff, welcher nur auf niedrigen Erdumlaufbahnen auftritt, reagiert mit der Oberfläche eines Raumfahrzeuges. Atomarer Sauerstoff wird zwischen der Beschichtung und dem Substrat gefangen. Dies kann zur Erosion des Substrates unterhalb der gegen atomaren Sauerstoff resistenten Beschichtung führen, wodurch das Wachstum von Hohlräumen verursacht wird. Diese Unterhöhlung könnte später zur Delamination größeren Flocken der Beschichtung führen. Der wichtigste Effekt der thermischen Wechselbeanspruchung durch große Temperaturschwankungen während des Ein- und Austritts aus dem Erdschatten besteht in den unterschiedlichen Raten der thermische Ausdehnung der Beschichtung und des Substrates. Durch die thermische Spannung entstehen Risse zwischen Beschichtung und Substrat, wodurch Flocken abgetrennt werden können. Die Oberflächenalterung durch thermische Wechselbeanspruchung kann durch die von ultravioletter Strahlung und atomarem Sauerstoff hervorgerufene Erosion des Lackbindemittels beschleunigt werden.

Man könnte darüber spekulieren, dass bei TOPAZ im Laufe der Jahrzehnte Teile der Oberflächenbeschichtung abgeblättert sind und die darunter liegende Metalloberfläche des Radiators zum Vorschein gekommen ist. Nach [3] besteht die Radiatoroberfläche aus Stahl. Es wird hier angenommen, dass es sich dabei um rostfreien Stahl handelt. Unter Verwendung von Werten aus [8] ergibt sich daraus ein Absorptions-zu-Emissions-Verhältnis von $\alpha/\varepsilon = 3,3$. Das ist um das Dreifache höher als bei schwarzer Beschichtung. Wenn es zu nennenswerten Oberflächenalterungsprozessen gekommen sein sollte, d. h. zu einem großflächigem Abblättern von schwarzer Farbe; könnte die daraus resultierende Änderung der optischen Eigenschaften die Ursache für die Erwärmung des Kühlmittels sein.

2.2. Austrittsursache

Die physikalische Ursache für den Austritt der Flüssigkeit ist wahrscheinlich der Innendruck im Kühlsystem. Wenn man eine Analogie zum Buk Reaktor annimmt, ist das Kühlsystem bei einem Druck von $p_0 = 1 \text{ atm}$ befüllt wor-

den. Es wird vermutet, dass der Abbau dieses Druckes gegenüber dem Vakuum das Kühlmittel aus dem Leck drückt.

Es muss diskutiert werden, ob weitere physikalische Effekte für den Kühlmittelaustritt verantwortlich sein können. Cosmos 1818 ist offensichtlich ein drei-achsen-stabiler Satellit. Er wird in eine erhöhte Umlaufbahn eingeschossen, in der er nach dem Ende seines Betriebes verbleibt. Der operationelle Orbit und die Friedhofsumlaufbahn sind identisch. Ein späteres Transfermanöver, wie dies bei den Satelliten des Typs RORSAT durchgeführt wurde, ist nicht erforderlich. Die Buk Reaktoren der Satelliten des Typs RORSAT mussten für das Transfermanöver spin-stabilisiert werden. Dazu wurden die Reaktoren um ihre Längsachse in Rotation versetzt. Diese Rotation kann zu Zentrifugalkräften führen, deren Einfluss beim Kühlmittelaustritt in der Literatur untersucht wird [2,6]. Beim TOPAZ Reaktor ist ein Aufspinnen nicht erforderlich. Deshalb treten keine Zentrifugalkräfte auf. Der einzige zu berücksichtigende Mechanismus ist der Druckabbau.

Es wird angenommen, dass im Falle einer Leckage durch eine Entspannung des Expansionstanks ein bestimmtes Volumen ins Vakuum gedrückt wird. Ein Expansionstank stellt Platz für expandierendes Volumen zur Verfügung, speichert dieses Volumen und erhält den Systemdruck aufrecht. Er fügt einem starren Drucksystem Elastizität hinzu. Expansionstanks müssen mit einem Druck vorgespannt werden, der etwas höher ist als der Druck des Prozesses. Für aggressive Fluide werden häufig Metallbälge verwendet. Das Design des Expansionstanks für TOPAZ ist unbekannt. Es wird angenommen, dass sich der Expansionstank bei einer Druckentlastung bis zu einem bestimmten Punkt entspannen kann. Im Falle einer Leckage, d. h. dem vollständigen Druckverlust des Kühlsystems, wird angenommen, dass die Entspannung bis zu einer bestimmten mechanischen Grenze erfolgt.

2.3. Öffnungsdurchmesser

Bei dem Kühlmittelaustritt aus dem TOPAZ Reaktor von Cosmos 1818 sind Tropfen entstanden, die so groß sind, dass sie mit dem Radar verfolgt werden können. Nach einer persönlichen Mitteilung von Nicholas Johnson vom NASA Orbital Debris Program Office, wird der Durchmesser des größten beobachteten Tropfens auf $d_{\max} = 5$ cm geschätzt. Das Auftreten großer Tropfen deutet auf einen großen Öffnungsdurchmesser hin. Wenn ein kapillarer Strahlerfall nach Rayleigh zugrunde gelegt wird, dürfte der Öffnungsdurchmesser etwa halb so groß sein wie der Durchmesser des maximalen Tropfens. Eine Öffnung dieser Größe macht es wahrscheinlich, dass eine Leckage an einem Rohr mit einem großen Durchmesser aufgetreten ist. Als Quellen kommen folgende Rohre infrage: zwei Sammelleitungen am Einlass und am Auslass des Radiators, drei Zuleitungen vom Reaktorkessel zur Einlasssammelleitung und drei Zuleitungen von der Auslasssammelleitung zum Reaktorkessel. Dass sind insgesamt 8 Rohrleitungen, die vermutlich einen Innendurchmesser im Zentimeterbereich aufweisen. Die maximale Größe der beobachteten Tropfen lassen eine Leckage aus einem Rohr mit geringem Innendurchmesser als unwahrscheinlich erscheinen. Die Kühlleitungen unterhalb der Radiatoroberfläche sind vermutlich klein. Ihr Durchmesser ist unbekannt. Es wird hier angenommen, dass er sich in

einer ähnlichen Größenordnung bewegt, wie beim Buk Reaktor. Beim Buk Reaktor hatten diese Rohre einen Innendurchmesser von 6 mm [6]. Bei einer Leckage hätte man Tropfen mit einer maximalen Größe von nur 1 cm zu erwarten. Diese Größe ist deutlich geringer, als die der beobachteten Tropfen. Es wird daher vermutet, dass eine Sammelleitung oder eine Zuleitung ein Leck aufweist. Die Ursache der Leckage ist unbekannt.

2.4. Schätzung der Kühlmittelmasse

Es soll abgeschätzt werden, wie viel Flüssigkeitsvolumen bzw. Masse aus dem Kühlkreislauf im Falle einer Leckage austreten kann. Die ausgetretene Masse wird als Anteil der Gesamtmasse berechnet. Es wurden keine Angaben in der Literatur zur Gesamtmasse des Kühlmittels gefunden. Deshalb ist es erforderlich, die Gesamtmasse zu schätzen. Es liegen keine Angaben zu den Abmessungen der Komponenten des Kühlsystems vor. Durchmesser und Länge von Rohren sind genauso unbekannt, wie die Größe des Reaktorkessels oder des Druckausgleichsbehälters (Expansionstanks). Diese Angaben werden einerseits basierend auf veröffentlichten Fotografien geschätzt, andererseits werden analoge Daten dem Buk Reaktor entlehnt. Aus den geometrischen Größen wird das Volumen und über die Kühlmitteldichte die Masse abgeschätzt. Zur Bestimmung der Kühlmitteldichte wird willkürlich eine Kühlmitteltemperatur von 300 K angenommen. Dies entspricht der Größenordnung der maximalen Temperatur im Sekundärkreis eines abgeschalteten Buk Reaktors [6]. Es wird davon ausgegangen, dass der TOPAZ Kühlkreislauf aus folgenden Komponenten besteht: Reaktorbehälter (Kessel), Zuleitungen zum Radiator, einem Druckausgleichsbehälter, Sammelleitungen am Radiatoreinlass und Auslass und den Kühlleitungen innerhalb der Radiatorfläche. Die Schätzung wurde unter vereinfachenden Annahmen durchgeführt. Das Ergebnis lautet, dass ca. 15,5 kg NaK im Kühlkreislauf des TOPAZ Reaktors enthalten sein könnte. Im Falle einer Leckage wird aber nur ein geringer Bruchteil dieser Masse in den Weltraum entweichen.

3. NAK AUSTRITTSMODELL

Die Größenverteilungsfunktion stellt eine Weiterentwicklung vorangegangener Modelle dar. Sie enthält drei wesentliche Parameter: den Durchmesser des größten Tropfens, den Durchmesser des kleinsten Tropfens und die Masse des abgelassenen Kühlmittels.

3.1. Ausgetretene Kühlmittelmasse

Es ist sinnvoll anzunehmen, dass das Kühlsystem unter Druck steht. Im Falle einer Leckage, kann der Druck ins Vakuum entweichen. Es wird angenommen, dass der treibende Mechanismus in der Entspannung des Expansionstank besteht. Es muss abgeschätzt werden, wie viel Flüssigkeitsvolumen der Expansionstanks in den Weltraum pressen kann. Dieses Volumen ist im Expansionstank gespeichert. Das Volumen ergibt sich aus der Differenz des Kehrwertes von zweier Dichten. Die Dichten berechnen sich aus unterschiedlichen Temperaturen mit Gl. (1).

$$V_{rel} = m_{loop} \left(\frac{1}{\rho_{NaK(300K)}} - \frac{1}{\rho_{NaK(262K)}} \right) \quad (1)$$

Es wird angenommen, dass sich das flüssigen Kühlmittel zum Zeitpunkt des Austritts in einem leicht erwärmten Zustand befindet und sich dessen Volumen dadurch um einen gewissen Betrag in den Expansionstank ausdehnt. Dies ist eine Annahme, die nicht bewiesen werden kann. Es wird willkürlich angenommen, dass das Kühlmittel an Bord von Cosmos 1818 eine Temperatur von 300 K aufweist. Der Mechanismus im Expansionstank (vermutlich ein Metallbalg) wird gespannt und setzt das Kühlmittel unter Druck. Analog zum Buk Reaktor wird angenommen, dass der Kühlkreislauf bei etwa einer atm Druck befüllt wurde. Es ist daher sinnvoll anzunehmen, dass bei 300 K ein Druck von etwa $p_0 = 1$ atm vorliegt. Als nächstes muss untersucht werden, wie weit sich der Balg bei Druckentlastung entspannen kann. Eine Schätzung könnte sich dadurch rechtfertigen, dass man eine sinnvolle Temperaturuntergrenze festlegt, bis zu der sich das Volumen des Kühlmittels verringern kann. Diese Untergrenze wäre dann die, bis zu welcher der Balg sich entspannen kann. Ein solche Untergrenze für die Entspannung anzunehmen ist aus konstruktiver Sicht durchaus sinnvoll. Sie würde die Bauform und damit die Abmessungen des Expansionstanks auf eine notwendige minimale Größe beschränken. Da NaK-78 bei etwa 262 K gefriert, wird davon ausgegangen, dass eine Expansion des Balgs bis zu der Volumenverringern möglich ist, die bei dieser Temperatur vorliegt. Unter der Annahme, dass die Gesamtmasse des Kühlmittels $m_{\text{loop}} = 15,5$ kg beträgt und unter der Verwendung der temperaturabhängigen NaK-Dichte nach [13], ergibt sich eine Gesamtmasse von 173 g, die in den Weltraum ausgetreten ist. Das ist sehr wenig. Das vermutete Verhalten des Expansionstanks während der der Druckentlastung des Kühlsystems ist in FIG 1 dargestellt.

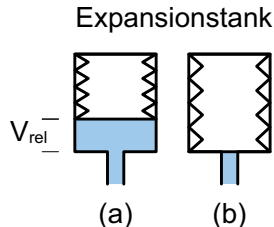


FIG 1. Vermutete Ursache des Kühlmittelaustritts. Entspannung des Expansionstanks und Austritt des Volumens V_{rel} aus dem Kühlkreislauf: (a) vor der Leckage, (b) vollständig entspannt.

3.2. Tropfengröße

Der größte Tropfen hat einen Durchmesser von ungefähr $d_{\text{max}} = 5$ cm. Bei einem Flüssigkeitsaustritt ins Vakuum kann der Öffnungsdurchmesser d_0 unter vereinfachenden Annahmen mit Hilfe der Gl. (2) geschätzt werden. Für die Entstehung des größten Tropfens wird der Rayleigh Mechanismus angenommen.

$$d_{\text{max}} = 1,89 d_0 = 0,05 \text{ m} \quad (2)$$

Unter der Annahme eines maximalen Tropfendurchmessers von 5 cm und unter Anwendung der Theorie des kapillaren Strahlzerfalls nach Gl. (2) beträgt der Durchmesser der Austrittsöffnung $d_0 = 2,65$ cm.

Über den kleinsten Tropfen liegen keine Informationen vor. Unter idealen Bedingungen eines kapillaren Strahl-

zerfalls wird in der Regel beobachtet, dass die Tropfen die 1,89-fache Größe des Öffnungsdurchmessers haben. Nun wird hier nicht davon ausgegangen, dass ideale Bedingungen vorliegen. Es gibt bspw. keinen Grund anzunehmen, dass der Öffnungsquerschnitt perfekt kreisförmig ist. Es ist daher sinnvoll zu vermuten, dass es eine Streuung der Tropfengröße um den Austrittsquerschnitt herum gibt. Die Breite dieser Streuung ist unbekannt. Sinnvoll ist aber die Annahmen, dass der kapillare Strahlzerfall der wesentliche Mechanismus bei der Tropfenentstehung ist. Eine Zerstäubung bspw. durch Gase wird ausgeschlossen. Deshalb wird willkürlich angenommen, dass der kleinste Tropfen sich um denselben Faktor von dem Austrittsquerschnitt unterscheidet, wie sich dieser vom größten Tropfen unterscheidet. Der Durchmesser des kleinsten Tropfens d_{min} wird mit Gl. (3) bestimmt.

$$d_{\text{min}} = d_0 / 1,89 = 0,014 \text{ m} \quad (3)$$

Die Streuung um den Austrittsquerschnitt herum wird als symmetrisch betrachtet. Diese Annahme ist willkürlich und kann nicht bewiesen werden.

3.3. Größenverteilungsfunktion

Setzt man das Volumen des größten Tropfens V_{max} ins Verhältnis zum kleinsten Tropfen, so macht der größte Tropfen fast die Hälfte des ausgetretenen Volumens V_{rel} aus. Das ist sehr viel. Bei einem so hohen Anteil ist es kaum noch möglich, eine Größenverteilung zu unterstellen, die der Form der Rosin-Rammler-Gleichung entspricht. Eine einfache Potenzfunktion ist völlig ausreichend. Dennoch soll hier basierend auf der modifizierte Rosin-Rammler-Funktion eine Größenverteilung entwickelt werden. Das Ziel besteht darin, eine generalisierte Form für Tropfenaustritte zu entwickeln. In vorangegangenen Veröffentlichungen konnte gezeigt werden, dass die Rosin-Rammler-Verteilung geeignet ist, die Form der Größenverteilung von ausgetretenen NaK-Tropfen zu beschreiben. Der Nachteil besteht darin, dass die Funktion am maximalen und minimalen Tropfen abgeschnitten werden muss. Diese abgeschnittenen Reste fehlen in der Massenbilanz. Dieses Problem wird mit der modifizierten Rosin-Rammler-Verteilung überwunden. Sie wurde auf das NaK Problem angewendet und führt zu guten Resultaten [16]. Der Nachteil dieser Beschreibung besteht darin, dass sie ebenso wie die nicht modifizierte Form dem größten Tropfen eine Anzahl von deutlich weniger als dem Wert „eins“ zuordnet. Dieser Fehler ist solange von geringer Bedeutung, wie die Anzahl der Tropfen hoch ist und der Volumenanteil des größten Tropfen V_{max} nur einen geringen Anteil des Gesamtvolumens V_{rel} ausmacht. Ist das Volumen des maximalen Tropfens groß im Verhältnis zum ausgetretenen Volumen, kann dieser Fehler nicht mehr ignoriert werden. Deshalb soll hier eine weitere Modifikation der Rosin-Rammler-Verteilung vorgenommen werden, wissend, dass unter den hier vorliegenden Bedingungen (geringe Tropfenzahl) dabei allerdings die Form der Funktion verloren geht. Die Modifikation besteht darin, von dem ausgetretenen Gesamtvolumen V_{rel} , das Volumen des größten Tropfens nach Gl. (4) zu subtrahieren. Die modifizierte Rosin-Rammler-Verteilung wird dann nur noch auf den verbleibenden Rest V_{tot} angewendet und der größte Tropfen später wieder hinzu addiert.

$$V_{\text{tot}} = V_{\text{rel}} - V_{\text{max}} \quad (4)$$

3.4. Rosin-Rammler Gleichung

Die Rosin-Rammler-Gleichung ist eine Massen- oder Volumengleichung. Sie wurde ursprünglich für Mahlgut entwickelt. Die Rosin-Rammler-Verteilung wird häufig in Studien über Zerstäubungsvorgängen angewendet, um experimentell gemessene Tropfenverteilungen zu beschreiben. Es gibt derzeit keinen Hinweis auf eine physikalische Bedeutung der Parameter außer, dass sie zu den gemessenen Werten passen. Diese streng empirische Funktion wird in einer kumulativen Form geschrieben. Die Rosin-Rammler-Verteilung wird als Anteil des Gesamtvolumens (oder Gesamtmasse) Q_3 von Tropfen (oder Partikeln) mit Durchmessern kleiner als d definiert. Die Parameter $d_{0.63}$ und q sind Konstanten. Q_3 wird als Durchgangssumme bezeichnet. Umgekehrt wird die Rückstandssumme R_3 durch Gl. (5) beschrieben.

$$R_3 = 1 - Q_3 = \exp \left[- \left(\frac{d}{d_{0.63}} \right)^q \right] \quad (5)$$

Die Konstante q ist der Verteilungsparameter, und $d_{0.63}$ ist der Größenparameter. Der Exponent q ist ein Maß für die Streuung der Tropfengröße und ist dimensionslos. Ein großer Wert von q beschreibt ein Spray mit sehr einheitlichen Tropfengrößen. Deshalb wird q auch als "Gleichförmigkeitsparameter" bezeichnet. Wenn q unendlich groß wird, haben alle Tropfen des Sprays dieselbe Größe. Der Parameter $d_{0.63}$ wird im folgenden als "charakteristischer Durchmesser" bezeichnet. Er beschreibt die Tropfengröße, wenn 63,2 % des gesamten Flüssigkeitsvolumens durchgegangen ist. Das bedeutet, dass $d_{0.63}$ der Tropfendurchmesser ist, bei dem 63,2 % des Gesamtvolumens in Form von Tropfen mit einem kleineren Durchmesser vorliegt. Dies entspricht einer Rückstandssumme von 36,8 %.

Die Bestimmung der Parameter der Größenverteilung für ein NaK-Austrittsereignis beruht auf einer Schätzung der oberen und unteren Grenze der Verteilungsfunktion. Dies sind der minimale und der maximale Tropfendurchmesser. Im Anschluss an die Schätzung des größten und kleinsten Tropfendurchmessers muss entschieden werden, welcher Anteil des Gesamtvolumens durch diese Tropfen repräsentiert werden soll. In dieser Arbeit wird vereinfachend angenommen, dass der größte Tropfen (Durchmesser d_{\max}) und die Summe der kleinsten Tropfen (jeweils mit dem Durchmesser d_{\min}) den gleichen Volumenanteil einnehmen, wobei das Volumen des größten Tropfens als Maßstab verwendet wird. Das Volumen des größten Tropfen V_{\max} wird mit Gl. (6) bestimmt. Der Rückstandsvolumenanteil der Rosin-Rammler-Gleichung beim Durchmesser des größten Tropfens wird mit Gl. (7) geschätzt.

$$V_{\max} = \frac{\pi}{6} d_{\max}^3 \quad (6)$$

$$R_{3,\max} = \frac{V_{\max}}{V_{\text{tot}}} \quad (7)$$

Das Flüssigkeitsvolumen V_{tot} wird aus der Dichte und der Gesamtmasse m_{tot} berechnet, wobei m_{tot} die Differenz der ausgetretenen Masse m_{rel} (0,173 kg NaK-78) abzüglich der Masse der größten Tropfen m_{\max} ist. Die Dichte ρ_{NaK} ist von der Temperatur abhängig. Es wird angenommen,

dass die Summe aller minimalen Tropfen das gleiche Volumen repräsentiert wie ein maximaler Tropfen. Der Rückstandsvolumenanteil der Rosin-Rammler-Gleichung beim Durchmesser der kleinsten Tropfen wird mit Gl. (8) geschätzt.

$$R_{3,\min} = 1 - R_{3,\max} \quad (8)$$

Mit diesen Annahmen kann der Gleichförmigkeitsparameter der Rosin-Rammler-Verteilung mit Gl. (9) berechnet werden.

$$q = \frac{\ln \left(\frac{\ln R_{3,\min}}{\ln R_{3,\max}} \right)}{\ln \left(\frac{d_{\min}}{d_{\max}} \right)} \quad (9)$$

Die Kenntnis des Gleichförmigkeitsparameters ermöglicht es, den charakteristischen Durchmesser mit Gl. (10) zu bestimmen.

$$d_{0.63} = \frac{d_{\max}}{\ln \left(\frac{1}{R_{3,\max}} \right)^{\frac{1}{q}}} \quad (10)$$

3.5. Modifizierte Rosin-Rammler Gleichung

Für eine korrekte Schätzung der Massenbilanz, ist es notwendig sicherzustellen, dass die gesamte Masse ausschließlich auf den Bereich der Größenverteilungsfunktion verteilt wird, der zwischen dem kleinsten und größten Tropfen liegt. Um dies zu erreichen, muss die Rosin-Rammler-Funktion modifiziert werden. In der Literatur wird eine Modifikation vorgeschlagen, die in Gl. (11) gegeben ist [9,10].

$$R_3 = \frac{1}{R_{3,\min} - R_{3,\max}} \left[\exp \left\{ - \left(\frac{d}{d_{0.63}} \right)^q \right\} - R_{3,\max} \right] \quad (11)$$

Unter der Annahme nach Gl. (8), dass die ignorierte Masse den gleichen Wert auf beiden Seiten der Größenverteilungsfunktion hat, kann Gl. (11) zu Gl. (12) vereinfacht werden.

$$R_3 = \frac{1}{1 - 2R_{3,\max}} \left[\exp \left\{ - \left(\frac{d}{d_{0.63}} \right)^q \right\} - R_{3,\max} \right] \quad (12)$$

Gl. (12) wird in eine Anzahlverteilung umgewandelt. Der größten Tropfen, der zuvor in Gl. (4) abgezogen wurde, wird in Gl. (13) mit einer Menge von "1" zurück addiert.

$$N_{\text{rel}} = N_{\text{tot}} + 1 \quad (13)$$

Die Tropfengrößenverteilung für das mögliche Kühlmittelaustrittsereignis von Cosmos 1818 ist in FIG 2 dargestellt.

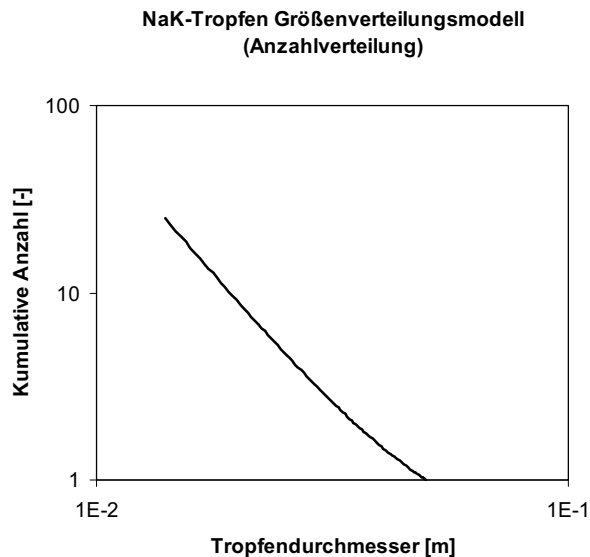


FIG 2. NaK-Tropfen Größenverteilungsmodell für eine Leckage aus einem TOPAZ Reaktor an Bord von Cosmos 1818, dargestellt als Anzahlverteilung. Aufgrund der niedrigen Anzahl der Tropfen ähnelt die Größenverteilung einer Potenzfunktion.

3.6. Zusatzgeschwindigkeit

Für die Bestimmung der Austrittsgeschwindigkeiten der Tropfen soll die Bernoulli-Gleichung verwendet werden. In dieser Gleichung, Gl. (14), wird die zusätzliche Geschwindigkeit Δv als eine Funktion des Druckes p im Inneren des Behälters und der Flüssigkeitsdichte ρ_{NaK} ausgedrückt.

$$\Delta v = \sqrt{2p / \rho_{\text{NaK}}} \quad (14)$$

Für die Berechnung der Geschwindigkeit ist es notwendig, den Druck im Inneren des Behälters zu schätzen. Es wird hier angenommen, dass der Druck im Kühlsystem in der Nähe der Fülldruckes p_0 bei etwa $p = 1 \text{ atm}$ liegt. Mit Gl. (14) wird die maximal mögliche Austrittsgeschwindigkeit auf $\Delta v_{\text{max}} = 15 \text{ m/s}$ berechnet. Die Tropfen wurden hauptsächlich in Flugrichtung des Satelliten freigesetzt.

4. SIMULATIONSERGEBNISSE

Das orbitale Verhalten der freigesetzten NaK-Tropfen wurde mit einer Dichte von $\rho_{\text{NaK}} = 900 \text{ kg/m}^3$ und einer mittleren zusätzlichen Geschwindigkeit von $\Delta v = 7,5 \text{ m/s}$ (mit einem Maximalwert von $\Delta v_{\text{max}} = 15 \text{ m/s}$) simuliert. Der Simulation zufolge sind 24 Tropfen im Größenbereich zwischen 1,4 cm und 5 cm freigesetzt worden, die sich zum 1. Mai 2009 alle noch in der Umlaufbahn befinden. Diese Anzahl der Tropfen sehr gering. FIG 3 zeigt die Verteilung der Tropfen über verschiedene Bahnhöhen als räumliche Dichte. Die Abbildung vergleicht den Beitrag der NaK-Tropfen von Cosmos 1818 zu allen anderen Weltraummüllquellen im Zentimeterbereich. Der Vergleich zeigt, dass dieses Ereignis nur eine geringe Auswirkung auf die Trümmerpopulation hatte. FIG 4 gibt einen Eindruck, wo sich diese Tropfen heute befinden.

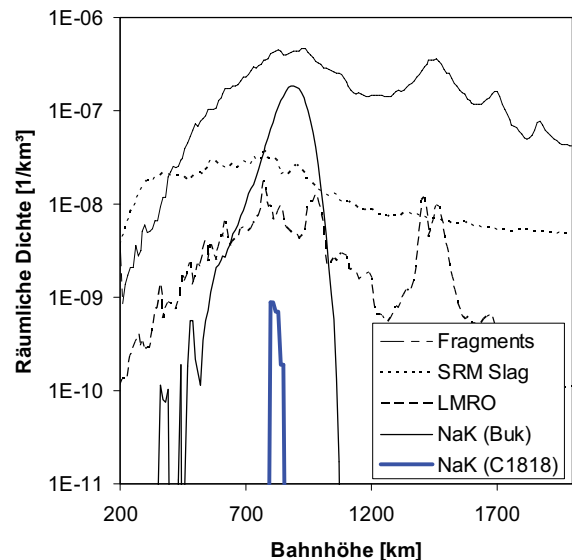


FIG 3. Simulierte räumliche Dichte von Objekten größer als einen Zentimeter über der Bahnhöhe (1. Mai 2009).

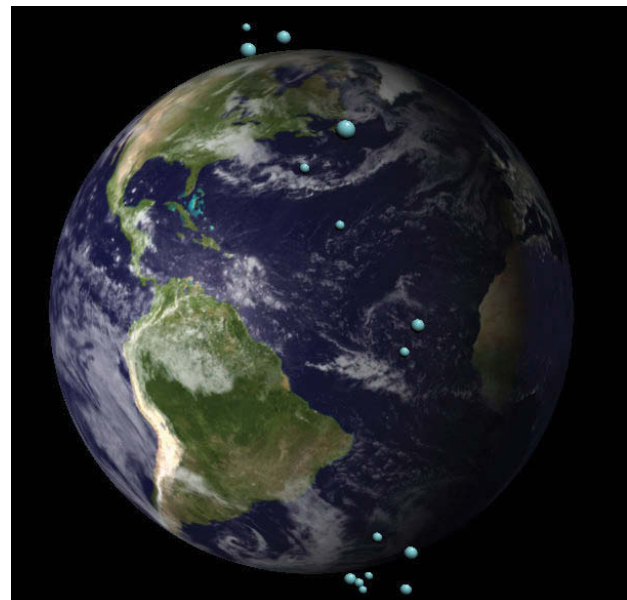


FIG 4. Simulierte Verteilung der NaK-Tropfen um die Erde gegen Ende des Jahres 2010. (Die Größe der Tropfen ist nicht maßstabsgerecht.)

5. MÖGLICHER AUSLÖSER DES EREIGNISSES

Der Auslöser für eine mögliche Leckage des Kühlsystems des abgeschalteten TOPAZ Reaktors an Bord von Cosmos 1818 ist unbekannt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Weltraummüllquelle in den Reaktor eingeschlagen ist. Der Reaktor befindet sich in einer Bahnhöhe, die eine hohe Trümmerdichte aufweist. Diese Trümmerdichte wird in Zukunft ansteigen. Da sich noch weitere abgeschaltete Reaktoren, überwiegend aus der RORSAT Serie, auf ähnlichen Umlaufbahnen befinden, sollte deren Verhalten beobachtet werden.

Die höchste Anreicherung von orbitalem Schrott findet sich im 900 km Bahnhöhe. In diesen Höhen liegt die

höchste Kollisionswahrscheinlichkeit vor. Bezüglich der Bahnneigungen werden hauptsächlich sonnensynchrone Satelliten ($i \approx 98^\circ$) und russische Objekte ($i \approx 82^\circ$) kollidieren. Dabei sind sehr energiereiche Frontalzusammenstöße bei doppelter Bahngeschwindigkeit in der Nähe der Erdpole zu erwarten, von denen viele als katastrophale Kollisionen auftreten werden. (Bei einer katastrophalen Kollision werden die Kollisionspartner zertrümmert. Wenn die dabei entstandenen Trümmerstücke ihrerseits katastrophale Kollisionen auslösen, spricht man von Feedback-Kollisionen.) Heute sind katastrophale Kollisionen noch kein großes Problem. Sie treten durchschnittlich alle 5 bis 10 Jahre auf. Wenn man aber Raumfahrt weiterhin so betreibt wie bisher, werden Kollisionen in Zukunft häufiger auftreten und könnten langfristig zum dominierenden Effekt bei der Erzeugung von Weltraummüll werden. Hinzu kommt, dass in der Nähe von 900 km Höhe ca. 30 ausgediente russische Kernreaktoren auf Friedhofsumlaufbahnen fliegen, deren Radioaktivität dort in den nächsten Jahrhunderten abklingen soll. Wenn der Kettenreaktionseffekt einsetzt, könnten diese Reaktoren als Kollisionspartner zur Verfügung stehen. Die wahrscheinlichen Positionen zukünftiger Kollisionen sind in FIG 5 dargestellt.

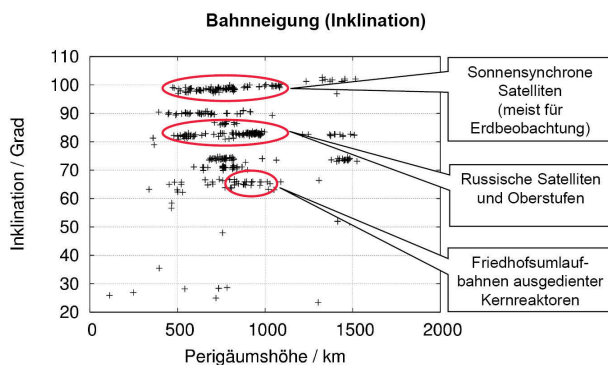


FIG 5. Simulierte zukünftige Kollisionen in Abhängigkeit von Inklination und Perigäumshöhe.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

NaK-Tropfen aus Kernreaktoren sind ein bekannter Beitrag zur Space Debris Umgebung. Ihre Entstehung wurde als unbeabsichtigte Begleiterscheinung der operationellen Kernabstoßung der Buk Reaktoren interpretiert. Beim Austritt von Kühlmittel aus einem TOPAZ Reaktor scheint es sich um das erste Ereignis zu handeln, das auf einem andern Austrittsmechanismus basiert. Die Ursache ist offensichtlich eine Leckage.

Diese Arbeit hat zwei Ziele. Es wird ein Modell zur Beschreibung des Kühlmittelsaustritts aus dem TOPAZ Reaktor entwickelt. Darüber hinaus soll das Modell zur Erzeugung einer Größenverteilungsfunktion verbessert werden. Die Tropfen-Größenverteilung wird als Volumen- bzw. Massenverteilung basierend auf einer modifizierten Rosin-Rammler-Gleichung dargestellt. Diese Gleichung wird weiter modifiziert. Bestehende Schwächen in der korrekten Beschreibung der Anzahl der Tropfen werden überwunden. Damit wird ein Modell geschaffen, dass nicht nur die Massenbilanz sondern auf die Tropfenzahl am Anfang und Ende der Größenverteilungsfunktion realistischer beschreibt. Bei der hier vorliegenden geringen Zahl an Tropfen, muss allerdings akzeptiert werden, dass die Form der Rosin-Rammler-Gleichung verloren geht. Die

Größenverteilung ähnelt eher einer Potenzfunktion.

Als Ursache für den Austritt wird eine Leckage einer Rohrleitung in Verbindung mit einer Entspannung des Expansionstanks vermutet. Die ausgetretene Masse an Kühlmittel wird auf etwa 200 g geschätzt. Das ist sehr wenig. Die Massen-basierte Größenverteilung wird in eine Anzahlverteilung umgewandelt. Das Modell erzeugt eine Anzahl von 24 freigesetzten Tropfen. Dies trifft nicht exakt die beobachtete Zahl von mehr als 30 Tropfen, stimmt aber mit der Größenordnung recht gut überein. Das Modell erzeugt Tropfen in einem Größenbereich zwischen 1,4 cm und 5 cm Durchmesser. Diese Schätzung basiert auf der Vermutung, dass eine Rohrleitung mit einem großen Durchmesser eine Leckage aufweist. Das Modell erhebt nicht den Anspruch, die tatsächliche Tropfenverteilung korrekt zu beschreiben. Die Parameter sollen lediglich die korrekte Größenordnung liefern. Die Parameter können in nachfolgenden Untersuchungen an die Messwerte angepasst werden.

Die berechnete maximale Ausströmgeschwindigkeit von 15 m/s stimmt exakt mit den Beobachtungen überein. Dies erlaubt den indirekten Nachweis, dass der TOPAZ Reaktor einen Innendruck von 1 atm aufweist. Der Austritt von Kühlmittel erlaubt die Schlussfolgerung, dass es offensichtlich Mechanismen gibt, die zu Leckagen führen können. Es befinden sich heute noch 32 ausgediente Kernreaktoren im All. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass sich ein solches Ereignis wiederholt.

7. LITERATUR

- [1] Andreev, P., Galkin, A., Zhabotinskii, E., *Selection of the coolant for thermionic-emission nuclear power-generating plants in spacecraft*, Atomic Energy, Vol. 72, No. 3, pp. 224-229, 1992.
- [2] Batyr, G., Ladygin, A., Morozoff, S., Serdjukov, S., Smirnov, V., Venyaminov, S., Yepishin, S., *The radar monitoring of the RORSAT attitude*, in: Kaldeich-Schürmann, B., Harris, B. (Eds.), Proceedings of the Second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany, 17-19 March 1997, (ESA SP-393, May 1997), ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp. 271-272, 1997.
- [3] Bogush, I., Gryaznov, G., Zhabotinskii, E., Makarov, A., Serbin, V., Trukhanov, Y., *Thermionic space nuclear power systems within the "Topaz" program: Construction principles and operating regimes*, Atomic Energy, Vol. 70, No. 4, pp. 263-266, 1991.
- [4] Bogush, I., Gryaznov, G., Zhabotinskii, E., Makarov, A., Serbin, V., Trukhanov, Yu., Vizgalov, A., Zrodnikov, A., Pupko, V., *Principal tasks and results of NPS flight tests within the "Topaz" program*, Atomic Energy, Vol. 70, No. 4, pp. 267-271, 1991.
- [5] Foster, J., Krisko, P., Matney, M., Stansbery, E., *NaK droplet source modeling*, IAC-03-IAA.5.2.02, presented at 54th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, 29 September - 3 October, 2003.
- [6] Grinberg, E., Grigoryev, B., Nikolaev, V., Sokolov, N., Nazarenko, A., *Interaction of space debris with liquid metal circuit of RORSAT satellites*, in: Kaldeich-Schürmann, B., Harris, B. (Eds.), Proceedings of the Second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany, 17-19 March 1997, (ESA SP-393, May 1997), ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp. 273-277, 1997.
- [7] Gryaznov, G., *30th anniversary of the startup of Topaz - The first thermionic nuclear reactor in the world*, Atomic Energy, Vol. 89, No. 1, pp. 510-515, 2000.

- [8] **Henninger, J.**, *Solar absorptance and thermal emittance of some common spacecraft thermal-control coatings*, NASA Center: Goddard Space Flight Center, NASA-RP-1121, 1984.
- [9] **Itoh, T., Matsumoto, K., Wanibe, Y.**, *Pulverization of molten Sn and Sn-Cu by a bladed rotator method*, Transactions ISIJ, Vol. 28, pp. 561-568, 1988.
- [10] **Itoh, T., Wannibe, Y.**, *Derivation of number based size distribution from modified mass based Rosin-Rammler distribution and estimation of various mean particle diameters of powder*, Transactions of the Japan Institute of Metals, Vol. 29, No. 8, pp. 671-684, 1998.
- [11] **Kessler, D., Matney, M., Reynolds, R., Bernhard, R., Stansbery, E., Johnson, N., Potter, A., Anz-Meador, P.**, *A search for a previously unknown source of orbital debris: The possibility of a coolant leak in radar ocean reconnaissance satellites*, IAA-97-IAA.6.3.03, presented at the 48th International Astronautical Conference, Turin, Italy, 6-10 October, 1997.
- [12] **Liou, J., Shoots, D. (Eds.)**, *New debris seen from decommissioned satellite with nuclear power source*, Orbital Debris Quarterly News, NASA Johnson Space Center, Orbital Debris Program Office, <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNV13i1.pdf>, Vol. 13, No. 1, pp. 1-2, 2009.
- [13] **O'Donnell, W., Papanikolaou, P., Reed, C.**, *The thermophysical and transport properties of eutectic NaK near room temperature*, Argonne National Laboratory, Report ANL/FPP/TM237, February 1989.
- [14] **Pupko, V.**, *Work on nuclear power plants for space*, Atomic Energy, Vol. 80, No. 5, pp. 335-338, 1996.
- [15] **Vol'berg, M., Gryaznov, G., Zhabotinskii, E., Makarov, A., Serbin, V.**, *Main principles of control of "Topaz" thermal-emission nuclear power plant in various modes*, Atomic Energy, Vol. 71, No. 6, pp. 1041-1044, 1991.
- [16] **Wiedemann, C., Flegel, S., Gelhaus, J., Krag, H., Klinkrad, H., Vörsmann, P.**, *NaK release model for MASTER-2009*, IAC-09.A6.2.7, presented at the 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Republic of Korea, 12-16 October, 2009.