

DIE MODELLIERUNG DER NATRIUM-KALIUMTROPFEN ALS BEITRAG ZUR ORBITALEN OBJEKTPOPULATION

C. Wiedemann

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

ÜBERSICHT

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Modellierung eines Sonderfalls des Weltraummülls, den Natrium-Kalium-Flüssigmetalltropfen, die aus orbitalen Kernreaktoren ausgetreten sind. Diese Tropfen werden üblicherweise als "NaK-Tropfen" bezeichnet. Zur Beschreibung des Beitrages zur Weltraummüllumgebung wird ein NaK-Austrittsmodell für das *Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference Model* MASTER-2005 entwickelt. Flüssigmetalltropfen sind beim Einsatz von Kernreaktoren in den 1980er Jahren freigesetzt worden. Das NaK-Austrittsmodell beinhaltet eine Anzahl-Größenverteilung, eine Geschwindigkeitsverteilung und eine Richtungsverteilung der Tropfen. Mit Hilfe dieses Austrittsmodells werden orbitale Tropfenwolken erzeugt und bis zu einer Referenzepeche propagiert. Das Modell berücksichtigt eine ungleichförmige Verteilung der Richtungen der Tropfengeschwindigkeiten. Mit dem Modell werden Simulationsrechnungen zum bahnmechanischen Verhalten der Tropfen durchgeführt. Dabei werden die relevanten Bahnstörungen, insbesondere die Restreibung der Atmosphäre, berücksichtigt. Zusätzlich werden die optischen Eigenschaften von Alkalimetalllegierungen untersucht, um Aussagen zur Verdampfungslebensdauer der NaK-Tropfen zu machen. Es werden zwei Ansätze für die Schätzung der monochromatischen optischen Eigenschaften für eine Sensitivitätsanalyse ausgewählt. Der Vergleich zeigt, dass die optischen Eigenschaften einen bedeutenden Einfluss auf die Verdampfungsrate eines Tropfens haben.

1. EINLEITUNG

Orbitale Kernreaktoren wurden in der Vergangenheit überwiegend von der Sowjetunion eingesetzt. Der Betrieb dieser Reaktoren hatte drei wichtige Auswirkungen auf die Weltraumumgebung oder die terrestrische Biosphäre:

- 1) die Freisetzung von Strahlung auf Erdumlaufbahnen, vorwiegend harter Gammastrahlung während des Betriebes eines Reaktors
- 2) die radioaktive Kontamination der Atmosphäre und der Erdoberfläche im Falle eines unbeabsichtigten Wiedereintritts eines Reaktors
- 3) die Freisetzung von Kühlmitteltröpfen, die zahlenmäßig einen wesentlichen Beitrag zur Population künstlicher Objekte auf Erdumlaufbahnen leisten

Die ersten beiden Punkte waren in der Vergangenheit Gegenstand mehrerer Untersuchungen und wurden in der Literatur ausführlich diskutiert. Der letzte Punkt, die Untersuchung des Beitrages der Kühlmitteltröpfen zum Weltraummüll (*Space Debris*), ist Gegenstand dieser Arbeit.

Die Freisetzung von Flüssigmetalltröpfen ist ein relativ

neues Forschungsfeld, da man erst seit der Mitte der neunziger Jahre durch Radarmesskampagnen über dieses Problem informiert ist. Bisher gibt es wenige systematische Arbeiten auf diesem Gebiet. Die Behandlung der Freisetzung und Verteilung der Tropfen auf Erdumlaufbahnen umfasst neben der höheren Bahnmechanik, dem klassischen Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe Raumfahrttechnik des Institutes für Luft- und Raumfahrtsysteme (ILR), eine umfangreiche Recherche über die technischen Ursachen des Austritts und die dabei vorliegenden Randbedingungen. D. h. es musste im Rahmen dieser Arbeit ermittelt werden, wie der Reaktor aufgebaut ist und betrieben wird. Die Verteilung der Tropfen auf Erdumlaufbahnen hängt von den Betriebsbedingungen und dem Reaktoraufbau ab. Um abzuschätzen, ob die Tropfen einer Verdampfung unterliegen, die ihre Lebensdauer beschränken könnte, müssen Aussagen zum thermalen Zustand der Objekte getroffen werden. Zur Erörterung dieser Fragen soll die hier vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten. Die ersten grundlegenden Veröffentlichungen zu diesem Thema stammen von Kessler [14-16] und diskutieren alle Fragestellungen des Problems ausführlich.

Die Freisetzung von Flüssigmetalltröpfen mit Durchmessern von bis zu mehreren Zentimetern unterscheidet sich von anderen Austrittsvorgängen ins Vakuum, bei denen vorwiegend sehr kleine Tropfen freigesetzt werden. Beim operationellen Ablassen von Flüssigkeiten mit hohem Dampfdruck wie bspw. Wasser entstehen kleine Tropfen bzw. Eispartikel [33-36]. Flüssigkeiten mit niedrigem Dampfdruck können bei zukünftig geplanten *Liquid Droplet Radiators* (LDR) freigesetzt werden. Die dabei entstehenden Tropfen oder Eispartikel haben aufgrund der sehr kleinen Objektdurchmesser bzw. der hohen Verdampfungs- oder Sublimationsraten eine geringe Lebensdauer und werden keinen langfristigen Beitrag zum Weltraummüll leisten. Der Austritt von Kühlmittel aus Kernreaktoren und die daraus resultierende Entstehung großer Objekte mit hoher orbitaler Lebensdauer ist ein historischer Sonderfall, der in absehbarer Zukunft nicht wieder auftreten wird.

1.1. Gegenstand der Untersuchung

Die Natrium-Kalium-Flüssigmetalltröpfen, die aus orbitalen Kernreaktoren ausgetreten sind, werden üblicherweise als "NaK-Tropfen" (*NaK Droplets*) bezeichnet. Diese Reaktoren mit der russischen Bezeichnung "Buk" (zu deutsch "Buche") wurden zur Erzeugung elektrischer Leistung an Bord von Radar-Ozeanüberwachungssatelliten des Typs RORSAT eingesetzt. Die Gesamtpopulation der Raumfahrtrückstände setzt sich aus unterschiedlichen Beträgen zusammen. Am bekanntesten ist der klassische Weltraumschrott, der ausgediente Raumfahrzeuge und

Trümmer zahlreicher Explosionen beinhaltet. Darüber hinaus gibt es weitere Beiträge, von denen einige erst vor verhältnismäßig kurzer Zeit in ihrer Bedeutung wahrgenommen wurden. Diese "neuen Quellen" haben inzwischen Eingang in Modelle zur Erfassung des Kollisionsrisikos von Satelliten mit orbitalen Objekten gefunden. Ein Beitrag zu diesen neuen Quellen sind die NaK-Tropfen. Mitte der 1990er Jahre entdeckte man während spezieller Radarmesskampagnen eine Anhäufung kugelförmiger Metallkörper von bis zu 5,68 cm Durchmesser in einer Bahnhöhe von etwa 900 km. Die Umlaufbahnen dieser Vollmetallkugeln konnten relativ schnell den nuklear betriebenen Satelliten des Typs RORSAT zugeordnet werden, die sich dort auf ihren Friedhofsumlaufbahnen befinden. Die Tropfen stammten aus den Kühlsystemen der Reaktoren dieser Satelliten. Die meisten heute beobachteten Weltraummüllobjekte sind NaK-Tropfen. Sie machen aufgrund ihres hohen Reflexionsvermögens etwa die Hälfte des optisch detektierten Weltraummülls aus. Die Ergebnisse der verschiedenen Messkampagnen werden in der Literatur vorgestellt [5, 6, 24-26, 40]. Verglichen mit der Gesamtzahl der orbitalen Trümmer ist der Beitrag der Tropfen geringer und beschränkt sich auf bestimmte Bahnhöhen. Auf diesen Umlaufbahnen leisten die Tropfen einen erheblichen Beitrag zum Weltraummüll. Zur Abschätzung der Tropfenzahl und ihrer orbitalen Verteilung ist eine Modellierung dieser Quelle erforderlich. Diese Modellierung ist Gegenstand dieser Arbeit.

Die Arbeit weist zwei wissenschaftliche Vertiefungen auf. Dies sind zum einen die Modellierung des Austritts der Tropfenwolke, insbesondere die Wahl einer geeigneten Größenverteilungsfunktion und zum anderen die Modellierung des thermischen Zustandes der Tropfen basierend auf den optischen Eigenschaften von Alkalimetalllegierungen. Es waren umfangreiche Recherchen erforderlich, die den Aufbau und die Funktionsweise des Reaktors und die optischen Eigenschaften betreffen. Besonders bei den optischen Eigenschaften war eine umfassende bibliografische Studie notwendig, da es bezüglich des Absorptionsverhaltens von Alkalimetallen im Sichtbaren und nahen Infraroten sowie der Legierungszusammensetzung an der Tropfenoberfläche widersprüchliche Angaben gibt. Dieser umfangreiche Literaturteil wird in [28] dargestellt.

Das NaK-Austrittsmodell muss in ein bestehendes Programmpaket eingefügt werden. Mit dem erweiterten Programm werden Simulationsrechnungen zur Bestimmung der orbitalen Verteilung der Tropfen durchgeführt, die das dynamische Verhalten der Objektverteilung im Weltraum nachbilden. Diese Modellierung der Weltraummüllumgebung ist die Kernkompetenz der wissenschaftlichen Arbeit der Raumfahrtgruppe am ILR. Das NaK-Austrittsmodell wird für das Raumfahrtrückstandsmodell MASTER-2005 entwickelt.

1.2. Das MASTER Modell

Der Austritt von NaK-Tropfen sowie deren Beitrag zur orbitalen Objektpopulation wird für das ESA-Weltraummüllmodell MASTER modelliert. MASTER (*Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference Model*) ist das europäische Modell zur Abbildung der Partikelumgebung auf Erdumlaufbahnen. Das Modell wird zur Abschätzung des Kollisionsrisikos zwischen Weltraummüllobjekten und Satelliten eingesetzt. Dem MASTER Modell liegen umfassende Bahnvorhersagetheorien und Volu-

mendiskretisierungsverfahren zugrunde, um die räumliche Dichte und die Geschwindigkeitsverteilung der Objekte in einem dreidimensionalen Kontrollvolumen darzustellen, wobei Bahnhöhen von LEO bis GEO berücksichtigt werden. Das NaK-Austrittsmodell kommt im Rahmen von MASTER-2005 zur Anwendung, das federführend vom ILR der TU Braunschweig im Auftrag der ESA entwickelt wurde. Die Entwicklung wird durch QinetiQ (UK), die Validierung der Ergebnisse durch die Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften FGAN und das Astronomische Institut der Universität Bern AIUB unterstützt.

Das Kernmodul von MASTER ist das Softwarepaket POEM, das am ILR entwickelt wurde. Die POEM (*Program for Orbital Debris Environment Modelling*) Software simuliert die Erzeugung und Propagation von orbitalen *Debris*-Objekten größer als 1 μm . Die Ausgabe von POEM stellt die *Debris*-Population des MASTER Modells der ESA bereit. Die Populations-Erzeugungsmechanismen basieren auf verschiedenen Untermodellen für jede berücksichtigte Quelle. Das Modell basiert auf der Simulation von Ereignissen, bei denen Weltraummüll erzeugt wurde. Eine Wolke aus Objekten wird simuliert, in der jedes Partikel seine eigenen Bahnelemente hat. Die unterschiedlichen Umlaufbahnen der simulierten Partikel werden bis zu einer Referenzepoche propagiert, wobei alle relevanten Bahnstörungen berücksichtigt werden.

POEM kann zur Modellierung der neu eingeführten Quellen und Ereignisse verwendet werden. Das Programm propagiert die Objektpopulation bis zu einer Referenzepoche. Das MASTER Modell enthält die eingefrorene Population zu dieser Referenzepoche, die in der Vergangenheit nahe beim Datum der Veröffentlichung der Software liegt. POEM erlaubt die Generierung einer neuen Referenzepoche, unabhängig von der veröffentlichten MASTER Population. Die Ausgabe von POEM kann verwendet werden, um den zukünftigen Fluss in Anhängigkeit von simulierten Quellen, wie bspw. den NaK-Tropfen, vorherzusagen.

1.3. Aufbau und Betrieb des Reaktors

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 sind nur zwischen 1980 und 1988 freigesetzt worden. Mit der Einstellung des RORSAT-Programms endete die Freisetzung weiterer Tropfen.

In der Literatur werden verschiedene Möglichkeiten des Kühlmittelaustritts diskutiert. Diese Möglichkeiten umfassen

- 1) den o. g. Austritt aus dem primären Kühlkreislauf während der operationellen Kernabstoßung [14, 16, 18, 19, 22],
- 2) den Austritt aus dem primären Kühlkreislauf infolge eines Zerbrechens bzw. einer explosiven Zerstörung des Reaktors [20, 21],
- 3) den Austritt aus dem sekundären Kühlkreislauf infolge des Einschlages von Weltraummüllobjekten in den Radiator [8, 14, 23].

Die Auswertung der Literatur kommt zu dem Ergebnis, dass der Austritt während der operationellen Kernabstoßung die wahrscheinlichste und vermutlich einzige Ursache für die Freisetzung ist. Der Reaktorkern wird direkt dem Weltraum ausgesetzt, ohne einen Behälter, der die Brennstäbe umgibt. Wenn man berücksichtigt, dass die Brennstäbe vorher mit NaK in direktem Kontakt waren, muss das Kühlmittel während der Kernabstoßung austreten. Die Abstoßung des Kerns ist mit einem Verlust der Versiegelung des primären Kühlkreislaufes verbunden.

In einer früheren Veröffentlichung versuchten Wiedemann et al. [27] die beiden für den Austritt aus dem primären Kühlkreislauf genannten Möglichkeiten, die Öffnung des Reaktorbehälters und die explosionsartige Freisetzung des Kühlmittels, miteinander zu verbinden. Dies führte zu der Annahme, dass die Kühlfüssigkeit bei erhöhter Temperatur ins Vakuum abgelassen und durch ein daraus folgendes heftiges Sieden (*Flashing* oder *Flash Evaporation*) zerstäubt wird. Dieser Ansatz wurde in [31] revidiert. Eine Siedezersprühung [33] ist nach dem derzeitigen Kenntnisstand unwahrscheinlich.

In der Vergangenheit gab es sehr unterschiedliche Beschreibungen des Reaktors in der Literatur. Dies ist dadurch bedingt, dass der Buk-Reaktor häufig mit den Reaktoren der Typen Romashka (Kamille) oder TOPAZ (Thermionische Energie Konversion in der Aktiven Zone) verwechselt wurde. Eine Beschreibung des Buk-Reaktors kann verschiedenen Quellen entnommen werden [1-4, 7, 22, 9-13, 17, 32]. Obwohl der Reaktor heute nicht mehr eingesetzt wird, unterliegt er als militärisches System teilweise der Geheimhaltung. Dies betrifft vorwiegend Informationen über den primären Kühlkreislauf und den Vorgang der Reaktorkernabstoßung. Eine ausführliche Literaturrecherche war daher notwendig, um möglichst viele Hinweise zum Kernabstoßungsmechanismus zu finden und zusammenzustellen.

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. RORSAT wird in Russland als Us-A bezeichnet. Der Satellit ist zylindrisch mit einem Durchmesser von 1,3 m, einer Masse von 3,8 t und einer Länge von 10 m (ohne Radarantennen). Die nukleare Energieversorgungsanlage ist mit einer Transferstufe verbunden. Der nukleare Brennstoff besteht aus 90 % angereichertem Uran-235,

das mit 3 Gewichtsprozenten Molybdän legiert ist. Die Gesamtmasse des Kerns beträgt 53 kg. Die Masse der Uran-Molybdänlegierung beträgt 31,1 kg. 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. Dieser Wert scheint allerdings zu niedrig, um die per Radar beobachteten Tropfen zu erklären. Amerikanische Untersuchungen deuten darauf hin, dass etwa 10 kg bis 11 kg NaK aus jedem der 16 Satelliten ausgetreten sind [5, 6]. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass 8 kg NaK pro Kernabstoßung freigesetzt werden. Diese Annahme entspricht in etwa dem Mittelwert zwischen 3,5 kg und 13 kg. Die Dichtigkeit des Sekundärkreises bleibt nach der Kernabstoßung erhalten.

Die Reaktorkernabstoßung wurde nach dem Absturz von Kosmos 954 als Zusatz-Strahlungssicherheitssystem eingeführt. Es soll im Falle eines unbeabsichtigten Wiedereintritts des Satelliten eine Verteilung und Verdünnung des nuklearen Brennstoffes in den oberen Schichten der Atmosphäre garantieren, um einen nuklearen Fallout auf der Erdoberfläche zu vermeiden. Dieses zusätzliche Strahlungssicherheitssystem wird auch "aerodynamisches Dispersionssystem" (ADS) genannt. Der erste und einzige "erfolgreiche" Einsatz des ADS erfolgte kurz vor dem Wiedereintritt des Satelliten Kosmos 1402. Seit der Existenz des ADS wurde es stets operationell im SHO aktiviert. Der Grund für diese Aktivierung ist unbekannt. Es kann darüber spekuliert werden, dass damit entweder die Zuverlässigkeit des ADS demonstriert wurde, die orbitale Lebensdauer der abgestoßenen Kerne verlängert werden sollte oder die Trennung des Brennstoffes vom Reflektor eine zuverlässige Deaktivierung des Reaktors sicherstellen sollte. Die Aktivierung des ADS im SHO ist für den Austritt des Kühlmittels verantwortlich.

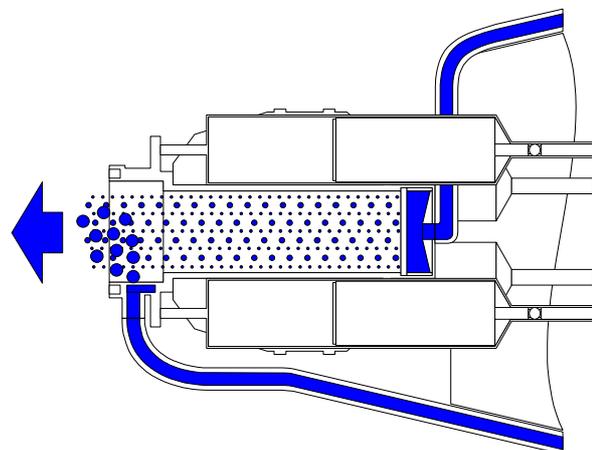


FIG 1. Vermuteter NaK-Kühlmittelaustritt mit Tropfenentstehung an zwei Schnittstellen, dem Reaktorhals (links) und dem Reaktorfuß (rechts).

Der vermutete Vorgang des Kühlmittelaustritts ist in FIG 1. dargestellt. Es gibt nur wenige Informationen über die Details des Kernabstoßungsverfahrens. Gryaznov et al. [11] erwähnt Festtreibstoff oder Gasgeneratoren als mögliche Aktuatoren für das ADS, wobei unklar bleibt, welche dieser Aktuatoren beim Buk-Reaktor eingesetzt werden. Wetch [43] deutet an, dass der Reaktorhals mit Hilfe einer Gasflasche unter Druck gesetzt wird. Da beide Quellen "Gas" erwähnen, wird angenommen, dass Gas-

druck als treibende Kraft zur Ausstoßung des Kerns verwendet wird. Vermutlich wird das Gas direkt in den Kessel eingeleitet. Es wird angenommen, dass nur das Kühlmittel am Boden des Reaktorkessels (rechts in FIG 1.) mit Gas vermischt wird. Die in den Leitungen und den Expansionsstanks verbleibende Kühlflüssigkeit, unterhalb des Reaktorkerns, ist unter dieser Voraussetzung nicht von der Vermischung betroffen. Das expandierende Gas kann zu einer Zerstäubung der Flüssigkeit führen. Die Höhe des Gasdruckes ist unbekannt. Es wird angenommen, dass der Kühlmittelaustritt eine in Kauf genommene aber nicht weiter kontrollierte Begleiterscheinung der Kernabstoßung ist. Das bedeutet, dass es wahrscheinlich keine speziellen Vorrichtungen zum Ablassen der Flüssigkeit gibt, wie z. B. Ventile.

Die vereinfachte Darstellung des Kühlmittelaustritts in FIG 1. ist die Grundlage für das hier zu entwickelnde Modell. Es wird angenommen, dass die Kernabstoßung zur Folge hat, dass der primäre Kühlkreislauf an zwei Stellen geöffnet wird. Dadurch entstehen vermutlich zwei unterschiedliche Arten von Schnittstellen, die verschiedenen großen Öffnungsdurchmesser aufweisen. Es wird vermutet, dass am Reaktorkopf (links in FIG 1.) eine Kühlleitung geöffnet wird, die wenige Zentimeter Durchmesser aufweist. (Im Folgenden wird Durchmesser von 3 cm zugrunde gelegt.) Am Reaktorboden wird ein Verteiler, ähnlich einem Sprinklerkopf, vermutet. Dort könnten zahlreiche Öffnungen entstehen, deren Durchmesser jeweils auf mehrere Millimeter (ca. 5 mm) geschätzt wird. Die unterschiedlichen Öffnungsdurchmesser haben unterschiedliche Tropfengrößen zur Folge.

2. DAS NAK-AUSTRITTSMODELL

Das NaK-Austrittsmodell umfasst eine Größen-, Geschwindigkeits- und Richtungsverteilung für die austretenden Tropfen. Die Entwicklung des Modells beginnt mit der Auswahl geeigneter Modellparameter und der Festlegung einer sinnvollen physikalischen Umgebung zur Beschreibung der Tropfenentstehungsmechanismen. Die Entwicklung des Austrittsmodells und die Validierung der Ergebnisse gegen Radarmesswerte werden ausführlich in [29-31] beschrieben.

2.1. Modellparameter

Das Modell zur Beschreibung der Generierung von Weltraummüllobjekten durch Flüssigkeitsaustritte enthält sehr unterschiedliche Parameter, deren Einfluss auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse diskutiert werden muss und bewertet werden soll. Ein wichtiges Kriterium für die Bewertung ist die Beantwortung der Frage, welche Parameter sich quantitativ bestimmen lassen. Es ist notwendig, einige Parameter zu schätzen, da über die Bedingungen, die insbesondere bei einem unbeabsichtigten Austritt herrschen, wenige Informationen vorliegen. Das hat zur Folge, dass es Parameter gibt, die bekannt sind, und andere, die unbekannt sind. Ferner muss berücksichtigt werden, dass verschiedene Parameter gut oder schlecht abgeschätzt werden können. Diese Überlegungen haben Einfluss auf die spätere Modellentwicklung. Deshalb steht am Beginn der Modellierung eine Auswahl von Parametern, deren Einfluss als entscheidend angesehen werden kann. Ferner soll der Versuch unternommen werden, das Modell mit einer möglichst geringen

Zahl von Parametern auszustatten, um die praktische Anwendbarkeit zu erleichtern.

2.1.1. Parameter mit hoher Relevanz

Beim Weltraummüll ist die Abschätzung von Kollisionswahrscheinlichkeit und orbitaler Lebensdauer von Bedeutung. Bestimmende Parameter sind Anzahl, Masse und Durchmesser der Teilchen. Diese Größen lassen sich relativ gut schätzen.

Die Teilchenzahl ist für die Abschätzung der Kollisionswahrscheinlichkeit von entscheidender Bedeutung und leitet sich aus dem Gesamtvolumen bzw. der Gesamtmasse der austretenden Flüssigkeit ab. Das Flüssigkeitsvolumen ist in der Regel entweder bekannt oder kann aus dem Flüssigkeitsreservoir des Raumfahrzeuges abgeschätzt werden. Die Teilchenzahl wird mit Hilfe einer durchmesserabhängigen Verteilungsfunktion aus dem Gesamtvolumen bestimmt und ist von der Qualität der ausgewählten Größenverteilungsfunktion abhängig.

Die Teilchenmasse ist über die Dichte der Flüssigkeit an die Teilchengröße gekoppelt und wichtig zur Bestimmung der Kollisionsenergie. Die Verteilung der Teilchenmasse ist unter Zuhilfenahme der Größenverteilungsfunktion über das Volumen und die Dichte der Flüssigkeit abschätzbar.

Die Teilchengröße kann als Funktion des Durchmessers der Austrittsöffnung definiert werden. Dies ist hauptsächlich für die Bestimmung des größten Tropfendurchmessers wichtig. Der Austrittsquerschnitt ist unter Umständen unbekannt. Es ist aber möglich, hierfür sinnvolle Schätzungen anzugeben, die bspw. aus der technischen Konstruktion des Satelliten abgeleitet werden können. Im Falle einer Zerstäubung mit Gas spielt der Blasengehalt VF eine Rolle. Es gibt Möglichkeiten, den VF mit dem Durchmesser der Austrittsöffnung zu korrelieren. Der Blasengehalt VF spielt hauptsächlich bei der Abschätzung des kleinsten Tropfendurchmessers eine Rolle. Die Kenntnis der Teilchengröße führt zur Bestimmung der Parameter der Verteilungsfunktion. Die Größenverteilungsfunktion soll neben der Gesamtmasse der Flüssigkeit nur zwei weitere Parameter enthalten, die sich aus dem größten sowie dem kleinsten Tropfendurchmesser ableiten lassen.

2.1.2. Parameter mit niedriger Relevanz

Einige Parameter haben eine niedrige Relevanz, da sie die Modellergebnisse nur geringfügig beeinflussen. Dies betrifft die Austrittsgeschwindigkeit und die Austrittsrichtung. Die Geschwindigkeit ist hauptsächlich vom Innendruck des Behälters abhängig. Dieser Innendruck baut sich sehr schnell ab. Die Druckänderungsrate kann praktisch nicht modelliert werden. Deshalb ist eine relativ grobe Abschätzung der maximalen Austrittsgeschwindigkeit ausreichend. Niedrigere Geschwindigkeiten werden durch eine Verteilungsfunktion simuliert, die den Teilchen eine zufällige Geschwindigkeit zuweist. Wichtig ist die richtige Abschätzung der Größenordnung der Austrittsgeschwindigkeit. Es kann angenommen werden, dass die Austrittsgeschwindigkeit, verglichen mit den Zusatzgeschwindigkeiten bei Fragmentationsereignissen, grundsätzlich niedrig ist.

Die Austrittsrichtung ist kaum bekannt und kann nur abgeschätzt werden, wenn genaue Informationen über den Betrieb des Raumfahrzeuges vorliegen. Sonst muss sie vereinfachend als isotrop angesehen werden. In [31] werden die Abschattung infolge der Satellitengeometrie und die Lage des Satelliten berücksichtigt.

2.2. Tropfenentstehungsmechanismen

Zur Beschreibung der Tropfenentstehungsmechanismen werden einige grundsätzliche Annahmen getroffen. Es wird davon ausgegangen, dass die Kernabstoßung dazu führt, dass der primäre Kühlkreislauf an zwei Stellen aufgetrennt wird. Dadurch entstehen zwei unterschiedliche Öffnungen. Das Austrittsmodell orientiert sich ausschließlich an der vermuteten Geometrie dieser Öffnungen. Ferner wird angenommen, dass teilweise ein Gas-Flüssigkeitsgemisch entstehen kann, was zu einer aufschäumenden Zerstäubung führt. Die Tropfenentstehung lässt sich in zwei Kategorien einteilen:

- 1) Kapillarer Strahlerfall: Durch den Rayleigh-Mechanismus bilden sich Tropfen mit einem mittleren Durchmesser in der Größenordnung des Strahldurchmessers. Der maximale Tropfendurchmesser beträgt ungefähr das Doppelte des Strahldurchmessers.
- 2) Zerstäubung durch Bildung von faserförmigen Ligamenten, hervorgerufen durch Gasblasenexpansion: Faserförmige zylindrische Flüssigkeitsstrahlen bilden sich an der Austrittsöffnung. Sie zerfallen infolge des Rayleigh-Mechanismus in kleine Tropfen. Die Tropfendurchmesser sind eine Größenordnung kleiner als der Durchmesser der Austrittsöffnung.

Es wird angenommen, dass beide Prozesse auftreten. Zu einer Zerstäubung kann es beim direkten Einspritzen von Gas in den Reaktorkessel kommen. Der Strahlerfall könnte beim Austritt weiteren Kühlmittels aus den Leitungen des Primärkreises auftreten, hervorgerufen durch den Druck bzw. die Bauweise des Expansionstanks. Der Vorgang des Strahlerfalls wird zur Berechnung der maximalen Tropfengröße, der Prozess der Zerstäubung zur Berechnung der minimalen Tropfengröße herangezogen. Für das Modell müssen wichtige Parameter geschätzt werden, die unbekannt sind. Dies sind die Durchmesser der Austrittsöffnungen und der Gas- bzw. Blasengehalt V_F .

Der exakte innere Durchmesser der Zuleitungsrohre ist unbekannt. Deshalb werden hier ähnliche Rohrdurchmesser des Sekundärkreises herangezogen, um die Größenordnung des Öffnungsdurchmessers am Reaktorkopf (1) zu schätzen. Die größeren Sammel- und Zuleitungsrohre des Sekundärkreises haben innere Durchmesser von 4,2 cm und 2,1 cm [8]. Der durchschnittliche Rohrdurchmesser liegt in einer Größenordnung von 3 cm. Dieser Wert wird als Schätzung für den Öffnungsdurchmesser d_{01} am Reaktorkopf verwendet. Der maximale Tropfendurchmesser, der während der Kernabstoßung freigesetzt wird, beträgt 5,67 cm. Detaillierte Darstellungen zur Auswahl der Größenverteilungsfunktion, der Bestimmung der minimalen und maximalen Tropfengröße sowie der Parameter der Größenverteilungsfunktion findet sich in [29, 30].

3. THERMISCHES MODELL DER NAK-TROPFEN

In Abhängigkeit von den optischen Eigenschaften können die NaK-Tropfen unter Weltraumbedingungen einen flüssigen Aggregatzustand einnehmen. Deshalb kann ihre Lebensdauer nicht nur durch den atmosphärischen Widerstand sondern auch durch eine zu bestimmende Verdampfungsrate begrenzt werden. Die Untersuchungen in diesem Abschnitt sollen die Grundlagen für die Schätzung der Verdampfungsrate liefern. Dazu müssen die optischen Eigenschaften der NaK-Tropfen bekannt sein. In der Literatur finden sich nur wenige veröffentlichte Messwerte für NaK-Legierungen. Ferner kommen verschiedene Wissenschaftler bei der Untersuchung von reinem Natrium und Kalium zu unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich ihres Absorptionsverhaltens im Sichtbaren und nahen Infraroten. Um den in der Literatur untersuchten Einfluss verschiedener physikalischer Effekte auf das Absorptionsverhalten zu verstehen, wurden eine bibliografische Studie zu verfügbaren Messdaten sowie zur Theorie der optischen Eigenschaften von Alkalimetallen durchgeführt. Die Ergebnisse werden in [28] dargestellt und bewertet.

Wegen der begrenzten Anzahl von Messwerten für NaK-Legierungen ist eine Untersuchung der physikalischen Theorie zur näherungsweise Bestimmung der optischen Eigenschaften von Legierungen notwendig. Basierend auf der Drude-Theorie, die elektrische Eigenschaften verwendet, um die optischen Konstanten von Metallen zu bestimmen, werden die optischen Eigenschaften von NaK in Abhängigkeit von der Legierungszusammensetzung geschätzt. Das Ziel ist die Schätzung des Einflusses der optischen Eigenschaften von NaK-Legierungen auf die Verdampfungsrate. Ferner werden Parameter identifiziert, welche die Verdampfungsrate beeinflussen. Das Modell wird verwendet, um eine Sensitivitätsanalyse zur Durchmesserreduktion als Folge von Verdampfung durchzuführen, wobei die unterschiedlichen Verdampfungsraten der Legierungsbestandteile berücksichtigt werden.

3.1. Modellierung der optischen Eigenschaften

Aufgrund der Unsicherheit bezüglich der optischen Konstanten, werden hier zwei Ansätze verwendet, um einerseits die minimale und andererseits die maximale Absorption berücksichtigen zu können. Die minimale Absorption wird durch das Drude-Modell repräsentiert. Die maximale Absorption legt das Drude-Modell zugrunde und fügt bei jeder Wellenlänge, bei der eine zusätzliche Absorption gemessen wurde, diese der Drude-Absorption hinzu. Diese zusätzliche monochromatische Absorption wird unter Verwendung der Daten von Hietel [41] und El Naby [38] geschätzt. Für NaK-Legierungen erfolgt die Schätzung der zusätzlichen Absorption durch eine Interpolation zwischen den Werten von reinem Natrium und Kalium. Als Interpolationsfunktion wird auf eine einfache Geradengleichung zurückgegriffen. Die monochromatische Drude-Absorption zeigt einen glatten, nichtlinearen Verlauf über der Legierungszusammensetzung. Um die zusätzliche Absorption zu berücksichtigen, wird diese vereinfachend mit Hilfe der linearen Interpolation abgeschätzt und zur Drude-Absorption hinzu addiert. Die resultierende Absorption zeigt nun ebenfalls einen glatten, nichtlinearen Verlauf. Gerechtfertigt wird diese Vereinfachung durch Untersuchungen von Kent [42], der zeigen konnte, dass sich bei festen und flüssigen Metalllegierungen, die opti-

schen Konstanten generell mit glatten, nichtlinearen Kurven über der Legierungszusammensetzung ändern.

3.2. Das Thermalmodell

Zur Bestimmung der Verdampfungsrate muss die Wärmebilanz eines Tropfens aufgestellt werden. Die Änderung der Temperatur eines Tropfens mit der Masse und der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Zeit hängt von der Leistung dreier verschiedener Beiträge ab. Dies sind die absorbierte Leistung P_a , abzüglich der emittierten Leistung P_r und abzüglich der für die Verdampfung aufzubringenden Leistung P_{ev} . Die absorbierte Leistung P_a enthält Beiträge der Solarstrahlung $P_{a,S}$, der thermischen Erdeigenstrahlung $P_{a,th}$ und der reflektierten Erdalbedostrahlung $P_{a,alb}$. Die absorbierte Leistung der Sonne $P_{a,S}$ berechnet sich aus der Solarkonstante S [1353 W/m^2], dem solaren Absorptionsvermögen α und der Querschnittsfläche des Tropfens. Befindet sich der Tropfen im Erdschatten, wird dieser Beitrag nicht berücksichtigt. Die absorbierte Erdeigenstrahlung wird aus der durchschnittlichen thermischen Strahlungsleistung der Erde E_{th} [245 W/m^2], dem thermischen Absorptionskoeffizienten α_{th} und der Querschnittsfläche des Tropfens berechnet. Es wurde ein Softwaremodell entwickelt, das die Verdampfungsrate, die sich ändernde Legierungszusammensetzung und die Durchmesserreduktion eines Tropfens in Abhängigkeit von der Temperatur in zeitlichen Schritten von 60 s berechnet. Dieses Modell enthält Untermodelle für die optischen Eigenschaften, die Wärmebilanz und die orbitale Bahnmechanik.

Das Verhalten von NaK-Tropfen auf einer kreisförmigen Umlaufbahn von 900 km Bahnhöhe mit einer Inklination von 65° wird simuliert. Das Flüssigmetall wird mit einer Anfangstemperatur von 300 K in den Weltraum entlassen. Unter Verwendung der optischen Eigenschaften mit und ohne zusätzlicher Absorption werden die thermischen Zustände der NaK-Tropfen berechnet und verglichen. Die Ergebnisse sind in FIG 2. und 3. dargestellt. Die Simulation zeigt das thermische Verhalten eines Tropfens auf einer Umlaufbahn mit Erdschatten einschließlich Verdampfung bei einer Bahnhöhe von 900 km, beginnend 38,9 Stunden nach dem Kühlmittelaustritt.

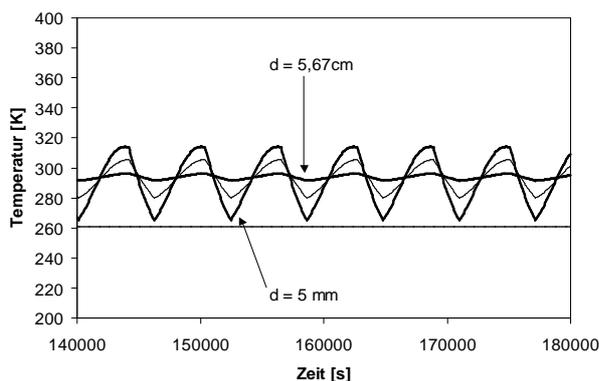


FIG 2. Der thermische Zustand von NaK-78 Tropfen mit Durchmessern von $d = 5 \text{ mm}$, 1 cm und $5,67 \text{ cm}$ unter Verwendung des Drude-Modells. (Die gerade Linie ist der Schmelzpunkt von NaK-78 bei 261 K).

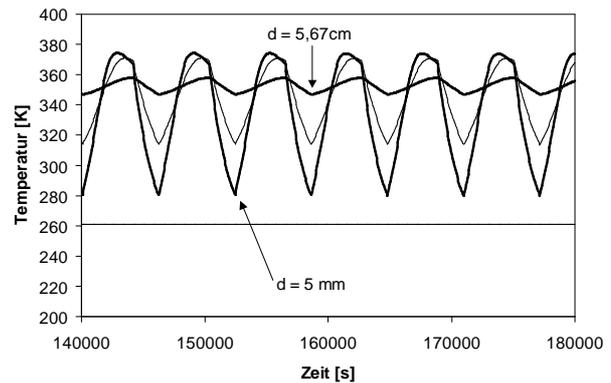


FIG 3. Der thermische Zustand von NaK-78 Tropfen mit Durchmessern von $d = 5 \text{ mm}$, 1 cm und $5,67 \text{ cm}$ unter Berücksichtigung der zusätzlichen Absorption.

Beim Drude-Modell variiert das Absorptions- zu Emissionsverhältnis (α/ϵ -Verhältnis) zwischen 1,46 und 1,54 (im Temperaturbereich von 260 K bis 320 K). Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Absorption sind diese Werte deutlich höher. Das α/ϵ -Verhältnis variiert von 3,07 bis zu 3,29 (im Temperaturbereich von 280 K bis 380 K).

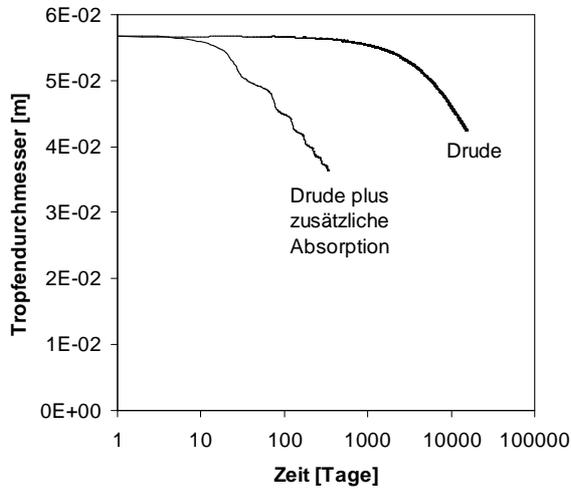
Experimente, die im Rahmen von Untersuchungen zur Oberflächenschichtung durchgeführt wurden, zeigen eine nur geringe Tendenz zur Segregation, weil Natrium und Kalium gut ineinander löslich sind [37, 39]. Deshalb wird in dieser Arbeit vereinfachend davon ausgegangen, dass die Legierungszusammensetzung des Tropfeninneren und seiner Oberfläche identisch sind. Ferner wird angenommen, dass die Temperaturverteilung innerhalb eines Tropfens gleichförmig ist. Basierend auf dem thermischen Zustand wird das physikalische Langzeitverhalten der Tropfen berechnet.

FIG 4. zeigt das Verhalten von NaK-Tropfen mit einem anfänglichen Durchmesser von 5,67 cm. Zwei unterschiedliche Modelle für die optischen Eigenschaften werden miteinander verglichen. Dargestellt werden die Reduktion des Tropfendurchmessers (a) und die Reduktion des Kaliumanteils in Gewichtsprozenten (b) in Abhängigkeit von der Zeit. Die Berechnung der Verdampfungsrate wird nur für die Temperaturen durchgeführt, in denen die Legierung in flüssiger Form vorliegt. Unterschreitet die Temperatur die Liquiduslinie, wird die Simulation abgebrochen. Die optischen Eigenschaften mit dem höheren Absorptionsvermögen führen zu einer erhöhten Verdampfungsrate, die den Durchmesser relativ schnell reduziert. FIG 4. (b) zeigt, dass der hohe Verlust an Kalium für die schnelle Durchmesserreduktion verantwortlich ist. Dies begründet sich durch den höheren Dampfdruck von Kalium.

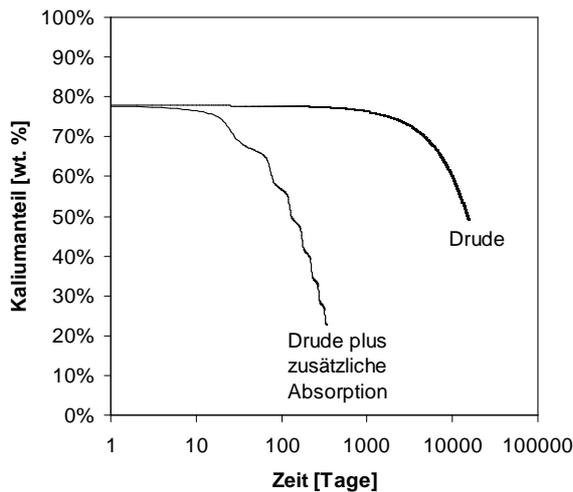
3.3. Zusammenfassung

Die berechneten Verdampfungsraten sind hoch und widersprechen Langzeitbeobachtungen, bei denen keine Veränderung des Tropfendurchmessers festgestellt werden konnte. Aufgrund der zahlreichen Schätzungen und Vereinfachungen bezüglich der optischen und thermophysikalischen Eigenschaften von NaK-Legierungen ist eine quantitative Abweichung zu erwarten. Aufgrund der Tatsache, dass nur qualitative Aussagen zum physikalischen

Langzeitverhalten der Tropfen gemacht werden können, wird die aus der Verdampfungsrate resultierende Durchmesserverringern nicht als Parameter in das NaK-Modell zur Simulation des orbitalen Langzeitverhaltens aufgenommen.



(a)



(b)

FIG 4. Langzeitsimulation der Verdampfung eines NaK-Tropfens mit einem anfänglichen Durchmesser von 5,67 cm bei einer konstanten Bahnhöhe von 900 km.

4. DAS ORBITALE VERHALTEN DER NAK-TROPFEN

Das orbitale Verhalten von ausgetretenen NaK-Tropfenwolken wird simuliert. Die Tropfen werden als Kugeln mit zeitlich unveränderlichem Durchmesser (ohne Verdampfungsrate) und einer konstanten Dichte von 900 kg/m^3 modelliert. Dazu muss das NaK-Austrittsmodell in das Software-Tool POEM implementiert werden.

POEM (*Program for Orbital Debris Environment Modelling*) ist ein FORTRAN-Programm, das am Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme der TU Braunschweig entwickelt

wurde, um das bahnmehchanische Verhalten von Objektwolken auf Erdumlaufbahnen zeitabhängig simulieren zu können. POEM modelliert die Quellen der vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Weltraummüllumgebung durch Berücksichtigung der relevanten Quellen und Senken (z. B. Abstieg durch aerodynamische Abbremsung). Die Quellen werden durch die Berücksichtigung eines vom Anwender definierten Verkehrsszenarios (üblicherweise die historischen Ereignisse) und das Hinzuschalten verschiedener Erzeugungsmodelle simuliert. POEM wird dafür eingesetzt, frische Objektwolken zu generieren und deren Orbits bis zu einer gegebenen Referenzepoche zu propagieren. Ursprünglich wurde die Software einzig für das Fragmentationsmodell entwickelt. Aufgabe dieser zentralen Subroutine war die Simulation von orbitalen Explosionen und Kollisionen. Im Zuge der Modellerweiterung wurden die zusätzlichen Erzeugungsmechanismen der neuen Quellen in das Tool eingefügt. POEM setzt sich heute aus den folgenden Modulen zusammen:

- 1) Fragmente aus Explosionen und Kollisionen
- 2) Schlackepartikel aus Feststoffmotoren
- 3) NaK-Tropfen aus Kernreaktoren
- 4) West-Ford Nadeln
- 5) Farbpartikel (abgelöste Partikel infolge Oberflächenalterungsprozessen)
- 6) Ejecta (Auswurfpartikel aus Einschlägen kleiner Objekte auf Oberflächen)

Die einzigen Objekte, die nicht durch POEM generiert werden, sind Start- und missionsbedingte Objekte (LMRO), die direkt von verschiedenen Bahnelementdatenbanken stammen sowie die natürlichen Meteoriten, deren Flussdatenbanken durch ein weiteres Tool bereitgestellt werden.

Das Ziel der Simulationsrechnung ist die Bestimmung des Beitrages jedes NaK-Austritts zur Tropfenpopulation für die Referenzepoche, den 1. Mai 2005. Beginnend mit dem Satelliten Kosmos 1176 hat jeder RORSAT eine zusätzliche Masse von 8 kg in den Weltraum abgelassen. Entsprechend dem Austrittsmodell werden insgesamt 128 kg NaK in den Weltraum abgelassen. Mit der Einstellung des RORSAT-Programms 1988 endet die Freisetzung weiterer NaK-Tropfen. Die Gesamtmasse im All reduziert sich und erreicht zur Referenzepoche einen Wert von etwa 97 kg.

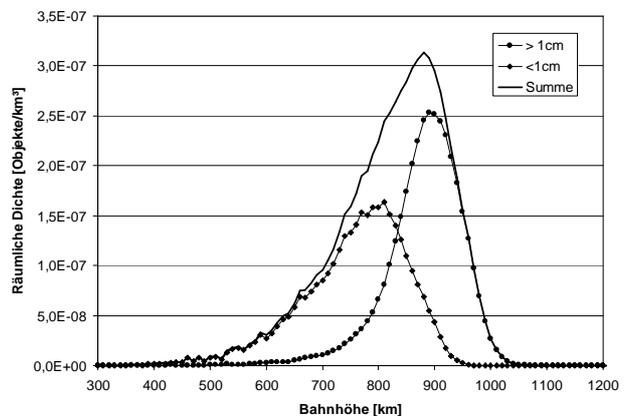


FIG 5. Räumliche Dichte der NaK-Tropfen für zwei Durchmesserklassen zur Referenzepoche, gültig für den 1. Mai 2005.

FIG 5. zeigt die Verteilung der Tropfen über verschiedenen Bahnhöhen. Dargestellt ist die räumliche Dichte, d. h. die Anzahl der Tropfen pro Volumenelement, in der Einheit "Objekte pro Kubikkilometer". Die Darstellung umfasst NaK-Tropfen, die sich zur Referenzepoche noch im Weltraum befinden. Die räumliche Gesamtdichte hat ein Maximum von ca. $3 \cdot 10^7$ Tropfen pro km^3 bei ungefähr 900 km Bahnhöhe. Die Gesamtdichte ist in zwei Größenklassen aufgeteilt, die zwischen Tropfen größer oder kleiner als 1 cm unterscheiden. FIG 5. zeigt, dass die Tropfen im Millimeterbereich sich aufgrund ihres geringeren ballistischen Koeffizienten auf niedrigeren Umlaufbahnen befinden als die Tropfen im Zentimeterbereich. Der Grund dafür liegt in dem niedrigen ballistischen Koeffizienten kleiner Tropfen. Der ballistische Koeffizient ist das Produkt aus dem Kehrwert des aerodynamischen Widerstandes und dem Verhältnis der Tropfenmasse zur Tropfenquerschnittsfläche. Dieses Verhältnis ist für kleine Tropfen gering. Das hat zur Folge, dass sich kleine Tropfen durch die Restatmosphäre leichter abbremsen lassen und dadurch schneller absteigen, bis sie in die Erdatmosphäre eintreten. Die Abstiegs geschwindigkeit ist proportional zum Kehrwert des ballistischen Koeffizienten. Zur Referenzepoche ist die Verteilung der NaK-Tropfen hauptsächlich auf Umlaufbahnen zwischen 700 km bis 1000 km Bahnhöhe beschränkt. Die Simulation zeigt, dass die Gesamtzahl der Tropfen im Weltraum zur Referenzepoche bei ungefähr 45.300 liegt, wobei der kleinste Tropfen einen Durchmesser von 5 mm aufweist. Tropfen mit kleineren Durchmessern sind zu diesem Zeitpunkt bereits abgestiegen.

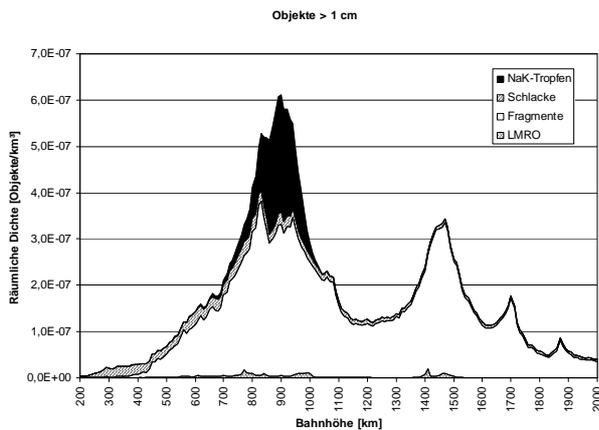


FIG 6. Die Verteilung der räumlichen Dichte von Objekten größer als 1 cm auf niedrigen Erdumlaufbahnen und ihre Aufteilung auf die verschiedenen Beiträge, gültig für den 1. Mai 2005. Der einhüllende Verlauf umfasst die Gesamtdichte (Simulationsrechnung).

Die räumliche Dichte von Objekten größer als 1 cm ist in FIG 6. gegeben. Diese Population enthält vier Beiträge zum Weltraummüll. Neben den Fragmenten und den LMRO gibt es NaK-Tropfen mit einem maximalen Durchmesser von 5,67 cm und Schlackepartikel mit einem maximalen Durchmesser von 3 cm. Den größten Beitrag auf niedrigen Erdumlaufbahnen liefern die Fragmente. Die Verteilung der NaK-Tropfen ist auf die Bahnhöhen zwischen 800 km bis 1000 km beschränkt, in denen die Tropfen ursprünglich erzeugt wurden. Der Grund für das Fehlen von NaK auf anderen Bahnhöhen liegt hauptsächlich in den geringen Zusatzgeschwindigkeiten von durch-

schnittlich 15 m/s, die den Tropfen in der Simulation des Austritts aus einem Reaktor aufgeprägt wurden.

Betrachtet man die Zentimeterobjekte auf sämtlichen Erdumlaufbahnen, einschließlich der geostationären Bahn, so ist die Anzahl der Flüssigmetalltropfen insgesamt deutlich geringer als die der anderen Beiträge. Die Tropfen treten aber dafür in einem schmalen Höhenband gehäuft auf. Die Flüssigmetalltropfen im Zentimeterbereich finden sich noch heute nur auf Umlaufbahnen nahe 900 km Höhe, wo sie zu mehr als 40 % zum Weltraummüll beitragen. Fragmente und Schlacke dagegen sind in allen Höhenbereichen, bis hin zur geostationären Bahn anzutreffen.

Die NaK-Population wird über die Referenzepoche hinaus propagiert, um das orbitale Langzeitverhalten zu untersuchen. Zur Simulation des Abstiegsverhaltens wird die Population bis ins Jahr 2040 propagiert und die räumliche Dichte über der Zeit und über der Bahnhöhe aufgetragen. FIG 7. zeigt die Entwicklung der räumlichen Dichte aller Tropfen vom Beginn der Kernabstoßungen im Jahr 1980. Das Maximum der räumlichen Dichte liegt nahe bei 850 km Bahnhöhe. Kleinere Tropfen steigen schneller ab und befinden sich überwiegend auf niedrigeren Bahnhöhen. Die Tropfenpopulation erreicht Mitte der 1980er Jahre ihren Höhepunkt und sinkt danach bis zum Ende der Simulationszeit um zwei Größenordnungen ab. Die signifikante Verringerung der räumlichen Dichte ist darauf zurückzuführen, dass die kleinen Tropfen eine sehr kurze orbitale Lebensdauer aufweisen, weil sie schneller durch die Restreibung der Atmosphäre abgebremst werden. Durch das schnellere Absteigen der kleinen Tropfen ist die räumliche Dichte auf niedrigen Umlaufbahnen anfänglich sehr hoch und baut sich schnell ab.

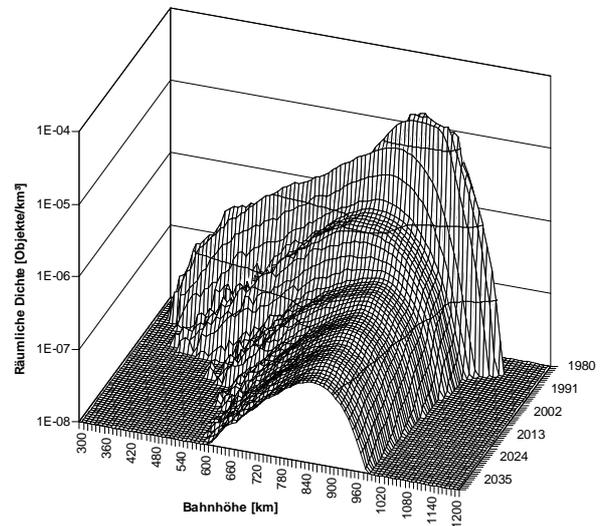


FIG 7. Simulierte räumliche Dichte der NaK-Tropfen größer als 1 mm auf Umlaufbahnen zwischen 300 km und 1200 km Bahnhöhe zwischen den Jahren 1980 und 2040.

FIG 8. zeigt den Einfluss der Solaraktivität auf das Abstiegsverhalten der Tropfen. Durch die Ausdehnung der Atmosphäre während erhöhter Solaraktivität steigen alle elf Jahre die Abstiegsraten deutlich an. Die höchste Abstiegsrate liegt in der Nähe des Jahres 1990.

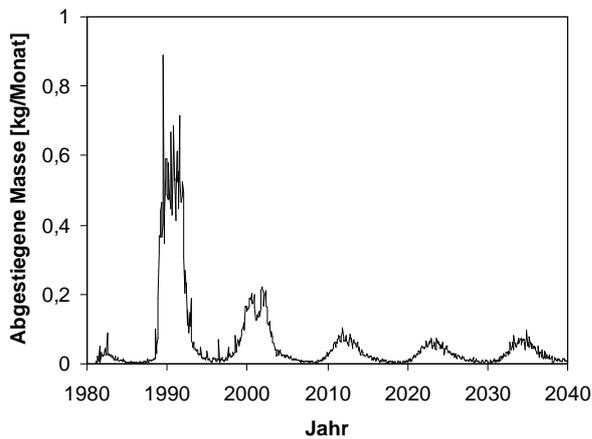


FIG 8. Simuliertes Abstiegsverhalten der NaK-Tropfen, dargestellt als monatlich abgestiegene Masse.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die NaK-Tropfen sind aus orbitalen Kernreaktoren ausgetreten. Diese Reaktoren mit der russischen Bezeichnung "Buk" (zu deutsch "Buche") wurden zur Erzeugung elektrischer Leistung an Bord von Radar-Ozeanüberwachungssatelliten des Typs RORSAT eingesetzt. Die Auswertung der Literatur kommt zu dem Ergebnis, dass der Austritt während der operationellen Kernabstoßung die wahrscheinlichste und vermutlich einzige Ursache für die Freisetzung ist. NaK-Tropfen sind nur zwischen 1980 und 1988 freigesetzt worden. Die pro Kernabstoßung ausgetretene NaK-Masse wird auf 8 kg geschätzt. Insgesamt sind demnach 128 kg ausgetreten, von denen sich zum 1. Mai 2005 noch 97 kg im All befinden. Mit der Einstellung des RORSAT-Programms endete die Freisetzung weiterer Tropfen.

Das entwickelte NaK-Austrittsmodell 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 (für den Fall, dass neue Details über den Reaktor bekannt werden oder Ergebnisse neuer Radarmesskampagnen veröffentlicht werden). Der Rayleigh-Mechanismus erklärt die Beobachtung, dass keine Tropfen mit einem Durchmesser größer als 5,67 cm entstanden sind. Bezüglich der Tropfenzahl sind die größten Ungenauigkeiten im Kleinteilbereich zu erwarten. Diese Ungenauigkeiten wirken sich nicht auf die Referenzperiode aus, da gezeigt werden konnte, dass alle kleinen Tropfen bereits in den 1990er Jahren abgestiegen sind.

Die qualitative Untersuchung des Verdampfungsverhaltens zeigt, dass Kalium schneller verdampft als Natrium. Durch das Absinken des Kaliumanteils besteht ein Tropfen mit zunehmender Lebensdauer überwiegend aus Natrium. Je kleiner ein Tropfen ist, desto schneller verringert sich sein Kaliumanteil. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass es inzwischen Tropfen gibt, die überwiegend aus Natrium bestehen.

Verbesserungspotential wird in folgendem Bereich gesehen. Die optischen Eigenschaften und das Segregationsverhalten von Natrium-Kaliumlegierungen sollten theoretisch und experimentell besser untersucht werden, um

eine realistische Schätzung für die Verdampfungsrate zu finden.

5. LITERATUR

- [1] -, *Communication of the USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy*, 26. September 1988, deutsche Übersetzung in: Grunst, M., *Strahlenschutzüberlegungen zum Messen und Bergen von radioaktiven Satellitenbruchstücken*, Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 26, Gustav Fischer Verlag, 1994.
- [2] -, *Space Experiment with TOPAZ-1*, On-Line Version des russischen Magazins: *Novosti Kosmonavtiki*, No. 6, 1999, <http://www.videocosmos.com/magazine/nk0699.html> (3. March 2000).
- [3] **Bennett, G.**, *Space Nuclear Power*, Encyclopedia of Physical Science and Technology, Third Edition, Vol. 15, 2002, pp. 537-553.
- [4] **Bludov, A., Vasilyev, V., Grinberg, E., Nikolaev, V.**, *Theoretical calculation and experimental substantiation of radiation safety system efficiency*, Specialist Conference on Nuclear Power Engineering in Space, Selected Papers: Obninsk, May 15-19, 1990, pp. 218-222.
- [5] **Foster, J., Krisko, P., Matney, M., Stansbery, E.**, *NaK Droplet Source Modeling*, paper IAC-03-IAA.5.2.02, International Astronautical Congress 2003.
- [6] **Foster, J., Stansbery, E., Matney, M., Benbrook, J., Jarvis, K.**, *Haystack and HAX Radar Measurements of the Orbital Debris Environment 1999-2002*, NASA Report, JSC-49875, October 2003.
- [7] **Gafarov, A.**, *The Problem of Space Nuclear Power Sources Collisions with Artificial Space Objects in Near-Earth Orbits*, in: El-Genk, M., Hoover, M., 10 th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion, 1993, pp. 99-103.
- [8] **Grinberg, E., Grigoryev, B., Nikolaev, V., Sokolov, N.**, *Interaction of Space Debris with Liquid Metal Circuit of RORSAT Satellites*, Proceedings of the Second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany, 17-19 March 1997, (ESA SP-393, May 1997), pp. 273-277.
- [9] **Gryaznov, G., Nikolaev, V., Serbin, V., Tyugin, V.**, *A Concept of radiation safety for nuclear power units in space and its implementation in the "Kosmos-1900" satellite*, Atomic Energy, Vol. 66, No. 6, June 1989, pp. 422-425.
- [10] **Gryaznov, G., Nikolaev, V., Serbin, V., Tyugin, V.**, *Radiation Safety of the Space Nuclear Power Systems and Its Realization on the Satellite Cosmos-1900*, in: El-Genk, M., Hoover, M., *Space Nuclear Power systems 1989*, Orbit Book Company, Malabar, 1992, pp. 453-456.
- [11] **Gryaznov, G., Zhabotinsky, E., Nikolaev, V., Serbin, S.**, *Problem Analysis of the Nuclear and Radiation Safety for SNPS*, Specialist Conference on Nuclear Power Engineering in Space, Selected Papers: Obninsk, May 15-19, 1990, pp. 48-51.
- [12] **Gummer, W., Campbell, F., Knight, G., Ricard, J.**, *Cosmos 954, The Occurrence and Nature of Recovered Debris*, Minister of Supply and Services Canada, INFO-0006, May, 1980.
- [13] **Hanafee, J.**, *Analysis of Beryllium Parts for Cosmos 954*, Lawrence Livermore Laboratory, University of California, Report UCRL-52597, October 25, 1978.
- [14] **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, Oct. 6-10, 1997, Turin, Italy.
- [15] **Kessler, D., Matney, M., Reynolds, R., Bernhard, R., Stansbery, E., Johnson, N., Potter, A., Anz-Meador, P.**, *The Search for a Previously Unknown Source of Orbital Debris: The Possibility of a Coolant Leak in Radar Ocean Reconnaissance Satellites*, NASA Report, JSC - 27737, LMSMSS32426, February 21, 1997.

- [16] **Kessler, D.**, *The Search for a Previously Unknown Source of Orbital Debris - The Possibility of a Coolant Leak in RORSATs*, 14-th IADC Meeting, ESA/ESOC, Darmstadt/Germany, 20-21 March, 1997, Minutes of Working Group 1, pp. WG1-1.
- [17] **Koroteev, A., Gafarov, A., Bakhtin, B., Kosov, A.**, *On the radiation safety studies of space nuclear sources at the Scientific Research Institute of Thermal Processes*, Proceedings of the Eighth Symposium on Space Nuclear Power Systems, 1991, pp. 270-287.
- [18] **Levitski, Yu., Lukiyashchenko, V., Moiseev, N., Senkevich, V., Ulanov, E., Yakovlev, M., Grinberg, E., Nikolaev, V.**, *The Problem of Space Environment Radioactive Pollution*, Space Forum, Vol. 1, 1996, pp. 103-107.
- [19] **Matney, M., Kessler, D.**, *Observations of RORSAT Debris Using the Haystack Radar*, Space Forum, Vol. 1, 1996, pp. 109-117.
- [20] **Meshcheryakov, S.**, *On the Estimation of the In-Orbit Collision Risk in the First Region of Maximum Contamination*, Russian Space Letter, Jan./Feb. 2001, <http://vincent.martinot.free.fr/> (11. April 2004), translated by Vincent Martinot, originally in: Near-Earth Astronomy (Space Debris), CosmosInform, Moscow, 1998 - ISBN 5-900242-25-0.
- [21] **Meshcheryakov, S.**, *Physical Characteristics of Alkaline Metals and Behaviour of Liquid Metal Coolant Droplets Occurring in Near-Earth Orbits*, Proceedings of the Second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany, 17-19 March 1997, (ESA SP-393, May 1997), pp. 257-259.
- [22] **Nazarenko, A., Morozov, N., Grinberg, E., Johnson, N., Khutorovsky, Z., Yurasov, V.**, *Analysis of the Fragmentation Situation in the Neighborhood of Russian Satellites with Nuclear Power Sources*, Space Forum, Vol. 1, 1996, pp. 125-134.
- [23] **Rossi, A., Pardini, C., Anselmo, L., Cordelli, A., Farinella, P.**, *Effects of the RORSAT NaK Drops on the Long Term Evolution of the Space Debris Population*, IAA 97-6.4.07, Presented at the 48th International Astronautical Conference, Oct. 6-10, 1997, Turin, Italy.
- [24] **Sridharan, R., Beavers, W., Gaposchkin, E., Lambour, R., Kansky, J.**, *Radar and Optical Characterization of an Anomalous Orbital Debris Population*, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 36, No. 5, September-October 1999, pp. 719-725.
- [25] **Sridharan, R., Beavers, W., Lambour, R., Gaposchkin, E., Kansky, J.**, *Remote sensing and characterization of anomalous debris*, Proceedings of the Second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany, 17-19 March 1997, (ESA SP-393, May 1997), pp. 261-269.
- [26] **Stansber(r)y, G., Matney, M., Settecerri, T., Bade, A.**, *Debris families observed by the Haystack orbital debris radar*, Acta Astronautica, Vol. 41, No. 1, 1997, pp. 53-56.
- [27] **Wiedemann, C., Bendisch, J., Klinkrad, H., Krag, H., Wegener, P., Rex, D.**, *Debris Modeling of Liquid Metal Droplets Released by RORSATs*, Space Safety and Rescue 1998, Volume 99, Science and Technology Series (IAA 98-6.3.03), pp. 139-153.
- [28] **Wiedemann, C., Erwig, S., Oswald, M., Stabroth, S., Klinkrad, H., Vörsmann, P.**, *Optical Properties of NaK Droplets*, paper SPACE2005-A-00150, Fourth European Conference on Space Debris 2005, Darmstadt, Germany.
- [29] **Wiedemann, C., Oswald, M., Stabroth, S., Klinkrad, H., Vörsmann, P.**, *Size distribution of NaK droplets released during RORSAT reactor core ejection*, Advances in Space Research, Vol. 35, 2005, pp. 1290-1295.
- [30] **Wiedemann, C., Oswald, M., Stabroth, S., Klinkrad, H., Vörsmann, P.**, *Die Modellierung des Austritts von NaK-Tropfen auf Erdumlaufbahnen*, paper DGLR-2004-117, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Dresden, 2004.
- [31] **Wiedemann, C., Oswald, M., Stabroth, S., Klinkrad, H., Vörsmann, P.**, *Modeling of RORSAT NaK Droplets for the MASTER 2005 Upgrade*, Acta Astronautica, Vol. 57, 2005, pp. 478-489.
- [32] **Zrodnikov, A., Poupko, V., Gryaznov, G.**, *Experimental Detection of Neutron Gas Pressure on the Control Rods of a Nuclear Reactor Under the Microgravity Conditions*, in: El-Genk, Proceedings of the 11th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion, 1994, pp. 625-629.
- [33] **Fuchs, H., Legge, H.**, *Flow of a Water Jet into Vacuum*, Acta Astronautica, Vol. 6, 1979, pp. 1213-1226.
- [34] **Muntz, E., Orme, M.**, *Characteristics, Control, and Uses of Liquid Streams in Space*, AIAA Journal, Vol. 25, No. 5, May 1987, pp. 746-756.
- [35] **Schön, M., Wulz, H.**, *Erkennung und Lokalisierung von Leckagen an flüssigkeits- und gasgefüllten Anlagen im Weltraum*, paper DGLR 91-273, DGLR Jahrbuch 1991, Band 1, pp.443-454.
- [36] **Wulz, H., Herrmann, H., Schön, M.**, *Leak Detection in Space*, paper SAE 941468, SEA Transactions, Journal of Aerospace, pp.1254-1268.
- [37] **DiMasi, E., Tostmann, H., Shpyrko, O., Deutsch, M., Pershan, P., Ocko, B.**, *Surface-induced order in liquid metals and binary alloys*, J. Phys.: Condens. Matter, Vol. 12, 2000, pp. A209-A214.
- [38] **El Naby, M.**, *Ein experimenteller Beitrag zur Elektronentheorie der Metalle durch Bestimmung der optischen Konstanten von Kalium*, Dissertation, Fakultät für Natur- und Geisteswissenschaften der Bergakademie Clausthal, 1962.
- [39] **Gonzalez, L., Gonzalez, D., Meyer, A., Silbert, M.**, *A theoretical study of the static structure of the Na_xK_{1-x} liquid alloy*, J. Phys.: Condens. Matter, Vol. 8, 1996, pp. 4465-4483.
- [40] **Hall, D., Africano, J., Kervin, P., Kelecyc, T., Kremeyer, K., Lambert, J., Okada, J., Ross, J., Sydney, P.**, *AMOS measurement of the physical properties of NaK droplets*, 2004 AMOS Technical Conference, Maui, Hawaii, 13-17 September 2004.
- [41] **Hietel, B.**, *Die optischen Eigenschaften des Alkalimetalls Natrium*, Dissertation, Fakultät für Natur- und Geisteswissenschaften der Bergakademie Clausthal, 1965.
- [42] **Kent, C.**, *The optical constants of liquid alloys*, Physical Review, Vol. 14, No. 6, December, 1919, pp. 459-489.
- [43] **Wetch, J.**, *Evolution of Space Reactor Safety*, 10 th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion, 1993, pp. 415-422.