

***AllBert EinStein* - Eine experimentelle Studie zum Eintritt von Meteoroiden in die Erdatmosphäre für planetare Abwehr und Analyse von Space Debris.**

Projektskizze

Michael Frühauf ¹ , **Christian Gscheidle** ¹, **Stefan Löhle**², **Gerhard Drolshagen**³, **Björn Poppe**³, **Philipp Reiß** ⁴, und **Ulrich Walter** ¹

¹Lehrstuhl für Raumfahrttechnik, TUM School of Engineering and Design, Technische Universität München

²Institut für Raumfahrtssysteme, Fakultät 6, Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Universität Stuttgart

³AG Medizinische Strahlenphysik und Weltraumumgebung, Fakultät VI, Medizin und Gesundheitswissenschaften, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

⁴Professur für Lunare und Planetare Explorationstechnologien, TUM School of Engineering and Design, Technische Universität München

 m.fruehauf@tum.de

11. April 2022 - Version 1.0 - Auf Aktualisierung prüfen unter: www.asg.ed.tum.de/lrt/allberteinstein

Zusammenfassung — Das Projekt *AllBert EinStein* soll durch die Beobachtung des kontrollierten Wiedereintritts eines oder mehrerer künstlicher Meteoroiden Daten für die Erforschung von Feuerkugeln und Space Debris liefern. Hierzu soll ein genau charakterisierter, künstlicher Meteoroid in den Weltraum gebracht werden und anschließend in der Atmosphäre verglühen. Die dabei entstehende optische Strahlung und deren spektrale Zusammensetzung wird über eine flugzeugbasierte Beobachtungskampagne aufgezeichnet. Die resultierenden Daten werden zur Bestimmung des photometrischen Strahlungsäquivalents (luminous efficacy), ein Maß für die Energieumwandlungseffizienz in optische Strahlung, sowie zur Verifikation von Laborexperimenten und Modellen genutzt. Dieses Wissen ist insbesondere für das Verständnis des Atmosphäreneintritts von Asteroiden, sowie zur Analyse des Wiedereintritts von Weltraumschrott nötig. Auf Grund der einfachen mechanischen, thermalen und elektrischen Struktur, sowie einer kurzen Missionsdauer, ist die technische Machbarkeitsschwelle niedrig und eine schnelle und kostengünstige Entwicklung möglich. Eine sinnvolle erste Missionsgelegenheit ist der Flug der zweiten *Spectrum* Rakete von *Isar Aerospace Technologies GmbH* im Rahmen der *Spectrum Demonstration Flights*.

1 Einleitung

Asteroideneinschläge gehören zu den wenigen Naturkatastrophen, denen die Menschheit durch Beobachtungen und potentielle Abwehrmissionen et-

was entgegenzustellen vermag. 2013 trat ein etwa 20 m großer Gesteinsasteroid plötzlich über der Stadt Chelyabinsk in die Erdatmosphäre ein und verletzte ca. 1500 Personen durch eine Luftdetonation [1]. Auch 2007 überraschte ein nur wenige Meter großer Asteroid die Fachgemeinschaft, da dieser nicht wie erwartet in der Atmosphäre verglühte, sondern bis zum Erdboden vordrang und dort einen Einschlagskrater, den Carancas Krater, hinterließ [2]. Beide Geschehnisse verdeutlichen die reale Gefahr auch durch kleine Asteroiden und zeigen auf, dass zur Identifikation und potenziellen Abwehr solcher Objekten noch große Forschungsnotwendigkeit besteht.

Eine Schlüsselrolle spielt dabei die Interaktion der eindringenden Objekte mit der Atmosphäre, welche *AllBert EinStein* genauer zu untersuchen soll.

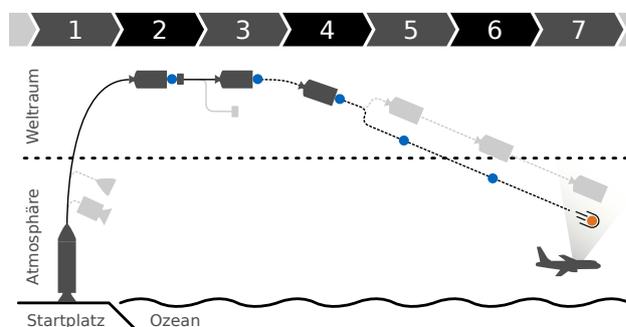


Abbildung 1 Schematische Darstellung der *AllBert EinStein* Mission und wichtiger Elemente: (1) Start des Trägersystems, (2) Oberstufe im Zielorbit, (3) Separation anderer Nutzlasten, (4) Deorbitmanöver der Oberstufe, (5) Separation *AllBert EinStein*, (6) Wiedereintritt *AllBert EinStein*, (7) Flugzeugbasierte Beobachtungen.

Hierbei sollen ein oder mehrere künstliche, genau charakterisierte Meteoroiden von je mehreren Kilogramm in den Weltraum transportiert werden und auf einer bekannten Trajektorie in der Erdatmosphäre verglühen, um deren Verhalten dabei zu beobachten. Ähnliche Experimente wurden in den 1960er-Jahren in den USA durchgeführt, bei welchen kleine Edelmetallscheiben von wenigen Gramm auf ballistische Trajektorien mit 10.0 km/s bis 11.9 km/s Wiedereintrittsgeschwindigkeit gebracht wurden [3, 4]. Der entscheidende Unterschied dieser Experimente zu *AllBert EinStein* liegt in der um 1000 bis 10 000-fach größer geplanten Masse des künstlichen Meteoroiden, wodurch nicht nur ein einfacher Meteor, sondern eine Feuerkugel erzeugt und untersucht werden soll. Soweit den Autoren bekannt, wurde noch kein solches Experiment durchgeführt.

2 Missionselemente

Abbildung 1 zeigt schematisch den Ablauf der *AllBert EinStein* Mission. Ein oder mehrere künstliche Meteoroiden starten auf einem Trägersystem, dessen Oberstufe in einen Zielorbit gebracht wird. Im Falle eines *Rideshares* können dort die Nutzlasten anderer Kunden von der Oberstufe separiert werden. Danach führt die Oberstufe ein Deorbitmanöver durch, um aus dem Zielorbit auf einen Kollisionskurs mit der Erde zu gelangen. Diese Prozedur wird regulär durchgeführt, um Weltraumschrott durch den Raketenstart zu vermeiden. Erst nach dieser Bahnänderung wird der künstliche Meteoroid von der Oberstufe entkoppelt, wodurch nun alle Objekte kontrolliert und mit definiertem Korridor in die Erdatmosphäre eintreten. Die zu erwartende Eintrittsgeschwindigkeit liegt in der Größenordnung von 7 km/s und ist abhängig vom Zielorbit und dem Deorbitmanöver. Der Wiedereintritt geschieht nach ESA Richtlinien über einem Ozean, sodass keine Gefahr für Menschen durch etwaige Überreste entsteht. Die durch den Wiedereintritt des künstlichen Meteoroiden entstehende Feuerkugel wird mit verschiedensten Messgeräten aus einem Flugzeug aufgezeichnet. Eine flugzeugbasierte Beobachtungskampagne ist nötig, um trotz eventueller Bewölkung das Ereignis beobachten zu können. Ähnliche Kampagnen wurden in der Vergangenheit beim Wiedereintritt des *Automated Transfer Vehicle (ATV)* oder zur Beobachtung des Draconiden Meteorstroms von der ESA durchgeführt [5, 6].

3 Wissenschaftlicher Nutzen

Beim Eintritt eines Meteoroiden in die Erdatmosphäre wird dessen Bahnenergie unter anderem als optische Strahlung abgegeben, welche als Meteor oder Feuerkugel beobachtet werden kann. Die Anzahl bodengestützter Feuerkugelkameras ist in den letzten zehn Jahren stark gestiegen und damit auch die Anzahl der Beobachtungen zur Erforschung dieser Objekte. Trotz fast einem Jahrhundert Forschung wird das photometrische Strahlungsäquivalent, ein Maß für die Energieumwandlungseffizienz in optische Strahlung, bis heute in Fachkreisen kontrovers debattiert [7, 8, 9]. Durch die Beobachtung des Wiedereintritts der Körper mit genau bekannter Zusammensetzung und Masse können (erstmalig) bestehende Modelle verifiziert und Annahmen zur Energieumwandlungseffizienz kalibriert werden.

3.1 Planetare Abwehr

Auch deutsche Universitäten sind an der Erforschung von Feuerkugeln beteiligt. Die Technische Universität München studiert Beobachtungen von Feuerkugelkameranetzwerken, um daraus eine Feuerkugelflussdichte zu bestimmen und Rückschlüsse auf die Verteilung von erdnahen und somit potentiell einschlagenden Meteoroiden und Asteroiden ziehen zu können. Das photometrische Strahlungsäquivalent spielt hierbei eine entscheidende Rolle, um die Masse des Ursprungsobjekts abschätzen zu können.

Die Universität Oldenburg arbeitet bereits an einer genaueren Bestimmung des photometrischen Strahlungsäquivalents durch Feuerkugelbeobachtungen [10]. Im Gegensatz zu natürlichen Meteoroiden, welche in der Atmosphäre verglühen, sind die Materialeigenschaften, Ursprungsmasse und Trajektorie unseres künstlichen Meteoroiden präzise charakterisiert. Es kann somit ein Fixpunkt für das photometrische Strahlungsäquivalent geschaffen werden kann. *AllBert EinStein* hebt sich dabei besonders durch eine realistische Größenordnung der Masse und Eintrittsgeschwindigkeit hervor.

An der Universität Stuttgart werden im Labor die Ablationsprozesse an Meteoroiden während des Eintritts in die Atmosphäre rekonstruiert [11]. Die spektroskopische Beobachtung der künstlich erzeugten Feuerkugel kann als wichtige Verifikation von Laborexperimenten fungieren.

Nicht zuletzt legte das *Planetary Defence Office* der ESA in jüngster Vergangenheit vermehrt ihr Augenmerk auf Feuerkugeln [12]. Somit ergänzt *AllBert EinStein* nicht nur die nationale Forschung perfekt, sondern kann neue Erkenntnisse für die internationale Wissenschaftsgemeinschaft und die Planetare Abwehr liefern.

3.2 Space Debris

Obwohl das Ziel des Projekts die Nachahmung eines natürlichen Meteoroiden und dessen Verglühen ist, handelt es sich dennoch um eine menschengemachte Raumsonde und ist somit auch für Forschende aus dem Bereich Space Debris interessant. Unter der Leitung der ESA wurde die Software *Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis (DRAMA)* entwickelt, um den Wiedereintritt von Weltraumschrott zu simulieren und Risikoabschätzungen zu generieren [13]. Mit Hilfe dieses Tools können auch die zu erwartenden Beobachtungen der Feuerkugel prognostiziert und somit die Genauigkeit der Software verifiziert werden. Die Schlichtheit des künstlichen Meteoroiden ist hier ein Vorteil, denn während konventionelle Raumfahrzeuge einen sehr komplexen Aufbau besitzen und somit die Simulation verkomplizieren, gibt es bei der Modellierung von *AllBert EinStein* nur wenig Unsicherheit und Interpretationsspielraum.

Da die Trennung des künstlichen Meteoroiden erst nach dem Deorbitmanöver der Oberstufe durchgeführt wird, werden beide Objekte eine sehr ähnliche Trajektorie besitzen. Somit können Informationen über den Flugverlauf der Feuerkugel auf die Oberstufe übertragen werden. Sind zusätzliche Aufnahmen der Oberstufe möglich, können beide Flugbahnen direkt verglichen und Unterschiede analysiert werden.

4 Technische Machbarkeit

Erste Abschätzungen der technischen Durchführbarkeit wurden basierend auf dem *Announcement of Opportunity* und dem *Spectrum Payload User Guide* der *Isar Aerospace Technologies GmbH* durchgeführt [14, 15]. Dessen Anforderungen sind in weiten Teilen ähnlich zu den Anforderungen anderer Launcher (z.B. Vega C [16]).

Ein vorläufiges Konzept der mechanischen Struktur ist in Abbildung 2 dargestellt. Hier stützt die Struktur die Probe, der Auslösemechanismus kann aktiviert

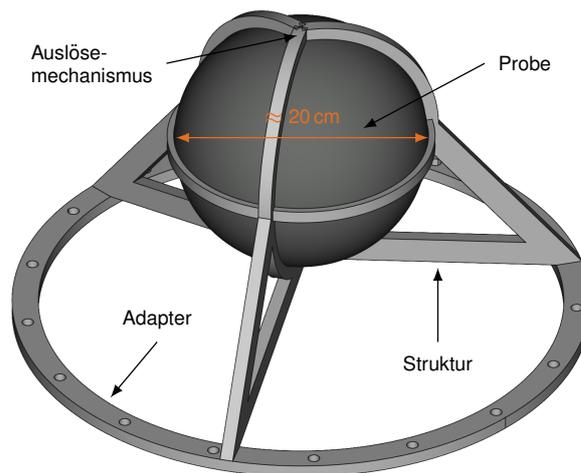


Abbildung 2 Rendering eines vorläufigen Konzepts der mechanischen Struktur mit der Probe.

werden um die Probe zu separieren und der Adapter wird zur Verbindung mit der Rakete eingesetzt. Der Auslösemechanismus muss noch genau definiert werden. Ein federgespannter Mechanismus mit kommerziellem Pin-Puller ist hierbei eine vielversprechende Option. Als Adapter zur Oberstufe ist ein kommerzieller Adapter vorgesehen (zum Beispiel RUAG PAS 381S).

Das vorläufige Gesamtmassenbudget inklusive Probe beläuft sich auf rund 60 kg, wobei 30 kg Probenmasse berücksichtigt sind. Der räumliche Bedarf ist auf Grund der hohen Dichte der Probe und des damit einhergehenden räumlich kleinen Aufbaus als unkritisch anzusehen.

Die mechanische Belastung ist die größte Herausforderung an die Mission: Die Gesamtmasse von Probe und Auslösemechanismus ist limitiert, die Probe soll möglichst schwer sein und zugleich muss die Struktur alle Kräfte während des Raketenstarts aufnehmen können. Modellberechnungen haben erste Eigenfrequenzen über 400 Hz mit einer Kugel aus Eisen ergeben, deutlich über den geforderten ersten Eigenfrequenzen von 20 Hz lateral bzw. 13 Hz longitudinal [15].

Auch in thermaler und elektrischer Hinsicht scheint die Mission ersten Analysen zu Folge unkritisch. Die Probe und die Struktur sind nicht anfällig für extreme (kalte oder warme) Umgebungstemperaturen und werden diesen auch nur kurze Zeit ausgesetzt. Eine eventuell nötige Elektronik, z.B. für den Auslösemechanismus, kann durch Heizer, Isolation und/oder optische Beschichtungen in ihrem jeweiligen operationalen Temperaturbereich gehalten

werden. Sollte die Mission bahnbedingt durch partikelstrahlungsreiche Regionen fliegen (z.B. Van-Allen Belts), kann die Elektronik entsprechend resistent ausgelegt werden. Auch stellt die Mission kaum Anspruch an die Datenbandbreite zur Rakete, da die Probe nicht instrumentiert ist und somit keine Daten produziert.

5 Ausblick

Eine aus Sicht der Autoren vielversprechende Flugmöglichkeit für die Mission ist der zweite Start der Spectrum Rakete von Isar Aerospace Technologies im Rahmen des *Spectrum Demonstration Flights* Programms im Jahr 2023 [14]. Im Allgemeinen ist die Möglichkeit, die Mission als *Rideshare* zu realisieren, ebenso gegeben, da der Wiedereintritt nur geringe Anforderungen an den Zielorbit des Raketenstarts stellt und durch die geringe technische Komplexität eine schnelle Anpassung für viele Missions-of-Opportunity möglich ist.

Die Mission wurde mit Personen des *Space Debris Office* und des *Planetary Defence Office* der ESA diskutiert und ihr wurde ein großer potentieller Nutzen attestiert. Auch in der wissenschaftlichen Fachgemeinschaft stößt der Missionsvorschlag auf breite Unterstützung.

Literatur

- [1] A. Kartashova, O. Popova, P. Jenniskens, *et al.*, “Eye-witness interviews on the Chelyabinsk airburst,” in *Proc. Int. Meteor Conf. Poznan*, pp. 189–192, 2013.
- [2] T. Kenkmann, N. Artemieva, K. Wünnemann, *et al.*, “The Carancas meteorite impact crater, Peru: Geologic surveying and modeling of crater formation and atmospheric passage,” *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 44, no. 7, pp. 985–1000, 2009.
- [3] R. McCrosky and R. Soberman, “Results from an artificial iron meteoroid at 10 km/sec,” *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, vol. 7, p. 199, 1963.
- [4] W. G. Ayers, “Luminous efficiency of an artificial meteor at 11.9 kilometers per second,” tech. rep., NASA, Aug. 1965.
- [5] J. Snively, M. Taylor, and P. Jenniskens, “Airborne imaging and NIR spectroscopy of the ESA ATV spacecraft re-entry: instrument design and preliminary data description,” *International journal of remote sensing*, vol. 32, no. 11, pp. 3019–3027, 2011.
- [6] J. Vaubaillon, P. Koten, A. Margonis, *et al.*, “The 2011 Draconids: the first European airborne meteor observation campaign,” *Earth, Moon, and Planets*, vol. 114, no. 3, pp. 137–157, 2015.
- [7] V. Svetsov and V. Shuvalov, “Thermal radiation and luminous efficiency of superbolides,” *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 503, pp. 10–16, 2018.
- [8] D. Subasinghe and M. Campbell-Brown, “Luminous efficiency estimates of meteors. II. Application to Canadian automated meteor observatory meteor events,” *The Astronomical Journal*, vol. 155, no. 2, p. 88, 2018.
- [9] D. Čapek, P. Koten, J. Borovička, *et al.*, “Small iron meteoroids-Observation and modeling of meteor light curves,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 625, p. A106, 2019.
- [10] E. Drolshagen, T. Ott, D. Koschny, *et al.*, “Luminous efficiency based on FRIPON meteors and limitations of ablation models,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 650, p. A159, 2021.
- [11] S. Loehle, M. Eberhart, F. Zander, *et al.*, “Extension of the plasma radiation database PARADE for the analysis of meteor spectra,” *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 56, no. 2, pp. 352–361, 2021.
- [12] R. Rudawska, “ESA’s activities on fireballs in Planetary Defence,” in *Proceedings of the International Meteor Conference*, pp. 143–146, 2020.
- [13] C. Martin, J. Cheese, N. Sanchez-Ortiz, *et al.*, “Introducing the ESA DRAMA tool,” in *55th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law*, pp. IAA–5, 2005.
- [14] German Aerospace Center at DLR, *Announcement of Opportunity for the Launch of Satellites on the Spectrum Demonstration Flights*, 2021.
- [15] Isar Aerospace Technologies GmbH, *Spectrum Payload User Guide*, 2021.
- [16] Arianespace, *Vega C User’s Manual*, 2018.