

»Gravity always wins«

Satelliten als Infrastrukturen einer extremen Umwelt

Florian Fockelmann

Am Nachmittag des 30. Dezember 2024 veränderte der Einschlag eines zunächst unbekannten Objekts das Leben der Dorfbewohner:innen im ostkenianischen Mukuku: Ein 500-Kilogramm schwerer Metallring war vom Himmel gefallen und hatte dabei nur zufällig keine Menschen oder Häuser getroffen.¹ Das für diesen *close encounter* verantwortliche Artefakt stellte sich als Weltraummüll heraus, die genaue Herkunft – und damit die Haftung – wird noch durch die kenianische Raumfahrtbehörde ermittelt.² Dieser Vorfall ist bei weitem nicht der erste Absturz von Objekten, die als Weltraummüll gelten. Dieser Müll, von ausgedienten Satelliten bis hin zu Trümmerteilen alter Raketen, sind historische Produkte und Gefahren der Raumfahrt.

»The use of space has grown exponentially. [...] Full-scale industrialization of outer space is under way, and space has become a critical arena for military strategists in the global duel.«³ Mit diesen Worten leitete Siegfried Wiessner 1983 in seine Abhandlung zur völkerrechtlichen Ordnung im All ein. Grundlage für die von Wiessner beschriebene umfassende Nutzung des Alls war und ist großtechnische Infrastruktur in Gestalt von Satelliten. Im Kontext des Kalten Krieges entstanden Netzwerke von Satellitendiensten, die sich in einer extremen Umwelt zu kritischen Infrastrukturen wandelten. Die Gravitation, so zeigt es das Eingangsbeispiel, scheint dabei immer nur für gewisse Zeiträume überwunden, letztendlich ›gewinnt‹ sie doch und ist damit Merkmal einer extremen orbitalen Umwelt.

1 Vgl. Hoffmann, Heiner/Fezehai, Malin: »Unser Dorf ist jetzt geschichtliches Welterbe!«, in: Der Spiegel, 12.01.2025, <https://www.spiegel.de/ausland/weltraumschrott-500-kilo-metallring-schlaegt-in-kenia-ein-kann-sowas-kuenftig-oefter-passieren-a-58f6a06a-216a-4783-b2e5-fo83a1fda747>.

2 Vgl. Anonym: »Possible Space Debris Impact in Kenia. A Piece of the Ariane SYLDA 2008–034C? [updated]«, in SatTrackCam Leiden (b)log, 08.01.2025, <https://sattrackcam.blogspot.com/2025/01/possible-space-debris-impact-in-kenia.html>.

3 Wiessner, Siegfried: »The Public Order of the Geostationary Orbit: Blueprints for the Future«, in: The Yale Journal of World Public Order 9 (1983), S. 217–274, hier S. 217.

Abb. 1: Titelseite »Space Age Pollution« von Jim Heaphy im Earth Island Journal von 1987.



Im vorliegenden Beitrag wird der erdnahen Weltraum als extremer Umweltbereich betrachtet, der durch Infrastrukturen erschlossen und verschmutzt wurde. Die 1980er Jahre werden hier als verdichtendes Jahrzehnt der unbemannten Raumfahrt identifiziert: Im politischen Raum stellte der Kalte Krieg mit seiner Verschärfung zu Beginn und seiner Konklusion zum Ende der Dekade ein zentrales Movens dar. Simultan nahm in einem Zeitraum von 1979 bis 1989 die wissenschaftliche und gesellschaftliche Wahrnehmung der durch Raumfahrt bedingten Verschmutzung zu. Exemplarisch wird hier die US-amerikanische Raumfahrt und die aus ihr entstandene Beeinflussung verschiedener Umwelten untersucht. Die infrastrukturelle Erschließung des Weltraums resultierte auch in einer anhaltenden Umweltverschmutzung. Im ersten Teil wird gezeigt, wie amerikanische Satelliten-

netzwerke – sowohl auf der Erde als auch im Orbit – durch sicherheitspolitische Bedürfnisse »kritisch« wurden. Der zweite Teil untersucht, wie sich in den Wechselwirkungen zwischen kritischer Infrastruktur und extremer Umwelt eine »space age pollution« manifestiert, die als persistentes Erbe dieser Erschließungsprozesse verstanden werden muss.

Bereits 1987 warnte der Weltraum-Friedensaktivist Jim Heaphy in einem Beitrag im *Earth Island Journal* vor mannigfaltigen Konsequenzen massiver Raumfahrtaktivitäten: »Short of the ultimate catastrophe of a nuclear war, the space arms race presents us with many environmental problems of varying magnitudes.«⁴ Der teils reißerische Text Heaphys ist Quelle einer Zeit, in der das menschliche Wirken im All abseits des Spektakels einer Mondlandung in die Öffentlichkeit rückte. Es handelt sich zwar nicht um den ersten populären Artikel zur Thematik des Weltraummülls, doch zeichnet ihn eine holistische Perspektive aus: Der Text vollzieht von den Startrampen über die Bahnverfolgungsstationen im Pazifik bis hin zu in-orbitalen Prozessen den Fließraum einer Infrastruktur nach.⁵

Telekommunikationssatelliten, so zeigte jüngst eine Studie aus historischer und medienwissenschaftlicher Perspektive, überwinden als Infrastrukturen politische und geografische Grenzen.⁶ Studien der Umweltgeschichte haben sich bisher in marginalem Umfang mit dem Weltraum beschäftigt. Bereits 2010 stieß US-Historiker Roger Launius an, den Weltraum als »extreme Environment« zu untersuchen.⁷ Anhand eines Meteoroideneinschlags auf dem Jupiter zeigte Dagomar Degroot die *agency* kosmischer Umwelten auf.⁸

Jüngst bilanzierte Lisa Ruth Rand: »Planets, stars, asteroids, and even the very fabric of the void itself has a rich, largely unexplored environmental history.«⁹ Aus diesen Erkenntnissen zeigt sich, dass die Umwelt des Weltraums nicht völlig von der bewohnten Umwelt der Erde abgetrennt scheint, wie im Folgenden weiter aufgezeigt wird.

4 Heaphy, Jim: »Space Age Pollution«, in: *Earth Island Journal* 2 (1987), S. 20–21.

5 Vgl. Laak, Dirk van: *Alles im Fluss. Die Lebensadern unserer Gesellschaft – Geschichte und Zukunft der Infrastruktur*, Frankfurt a.M.: S. Fischer ²2018.

6 Vgl. Evans, Christine und Lundgren, Lars: *No Heavenly Bodies. A History of Satellite Communications Infrastructure* (= *Infrastructures Series*), Cambridge, MA/London, England: The MIT Press 2023, S. 3–8.

7 Launius, Roger D.: »Writing the History of Space's Extreme Environment«, in: *Environmental History* 15 (2010), S. 526–532.

8 Vgl. Degroot, Dagomar: »A Catastrophe Happening in Front of Our Very Eyes. The Environmental History of a Comet Crash on Jupiter«, in: *Environmental History* 22 (2017), S. 23–49.

9 Rand, Lisa Ruth: »Falling Cosmos. Nuclear Reentry and the Environmental History of Earth Orbit«, in: *Environmental History* 24 (2019), S. 78–103, hier S. 81.

Satelliten-Kritikalität im Kalten Krieg

Satelliten entwickelten sich im Kalten Krieg zu kritischen Infrastrukturen für Politik und Militär. Die Expansion dieser Infrastrukturen und ihre Wahrnehmung als ›kritisch‹ in den 1980er Jahren werden hier skizziert. Der die amerikanische Gesellschaft ereilende Sputnik-Schock versorgte ab 1957 die durch den Zweiten Weltkrieg entstandene *Big Science* mit politischem und finziellem Kapital.¹⁰ Nach Ende des Wettkampfes zum Mond folgte eine globale Wendung nach ›innen‹, die sich auch in der Raumfahrtspolitik in Ost und West vollzog.¹¹ In dieser Zeit ›nach Apollo‹ erfolgte eine umfassende »Satellitisierung« des erdnahen Orbit. ¹² Ab 1981 versprach das Space Shuttle in den USA den Anbruch einer neuen Ära der Raumfahrt. Neben mehreren Astronauten sollte das Shuttle in seinem Frachtraum auch eine Vielzahl ziviler und militärischer Satelliten in die Erdumlaufbahn befördern – erstmals als wiederverwendbarer ›Pendler‹. Es sollte die große Anzahl an militärischen Satelliten in den Orbit verfrachten, nach welchen die US-Sicherheitspolitik im Kalten Krieg der 1980er verlangte. Für Aktivist:innen wie Heaphy stellte dies, besonders im Kontext der Strategischen Verteidigungsinitiative (SDI),¹³ eine bedrohliche Militarisierung der Raumfahrt dar.

Vor dem Hintergrundrauschen der am amerikanischen Exzessionalismus scheiternden Entspannungspolitik war die sicherheitspolitische Weltrauminfrastruktur kritisch geworden.¹⁴ Der satellitengestützten Warninfrastruktur hatten die Regierungen in Moskau und Washington von Beginn an die kritische Funktion zugeschrieben, vor Nuklearangriffen der Gegenseite zu warnen.¹⁵ Gemeinsam

¹⁰ Zur Wirkung des Sputnik-Schocks in den USA siehe u.a.: Dickson, Paul: *Sputnik. The Shock of the Century*, New York: Walker Pub, 2001. Boyle, Ryan: »A Red Moon over the Mall. The Sputnik Panic and Domestic America«, in: *Journal of American Culture* 31 (2008), S. 373–382; Galison, Peter (Hg.): *Big Science. The Growth of Large-Scale research*, Stanford: Stanford University Press 1994.

¹¹ Vgl. Geppert, Alexander C. T.: »The Post-Apollo Paradox. Envisioning Limits During the Planetary 1970s«, in: Ders. (Hg.), *Limiting Outer Space*, London: Palgrave Macmillan 2018, S. 3–26, hier S. 8.

¹² Vgl. Geppert, Alexander C. T.: »Phantasie, Projekt, Produkt. Astrokultur und der Weltraum des 20. Jahrhunderts«, in: APuZ 69 (2019), S. 19–25, hier S. 23–25.

¹³ Hierzu: Bateman, Aaron: *Weapons in Space. Technology, Politics, and the Rise and Fall of the Strategic Defense Initiative*, Cambridge, MA: The MIT Press 2024.

¹⁴ Vgl. Westad, Odd Arne: *Der Kalte Krieg. Eine Weltgeschichte*, München: C. H. Beck 2019, S. 557; A. Bateman: *Weapons in Space*, S. 3.

¹⁵ Vgl. Engels, Jens Ivo: »Relevante Beziehungen. Vom Nutzen des Kritikalitätskonzepts für Geisteswissenschaftler«, in: Jens Ivo Engels/Alfred Nordmann (Hg.), *Was heißt Kritikalität? Zu einem Schlüsselbegriff der Debatte um Kritische Infrastrukturen*, Bielefeld: transcript 2018, S. 17–46, hier S. 33–35; Högselius, Per/Kajiser, Arne/Vleuten, Erik van der: *Europe's Infrastruc-*

mit Aufklärungssatelliten machte dies 50 Prozent der gestarteten Satelliten aus.¹⁶ Sie dienten damit dem sozio-politischen Bedürfnis nach äußerer, militärischer Sicherheit. Als Infrastrukturen dienten sie so der Zirkulation von Informationen.¹⁷

Neue Bedeutung erhielten diese Infrastrukturen, als ihnen die Streitkräfte in den USA aber auch in der Sowjetunion eine direkte Rolle im Einsatz von Waffensystemen zudachten.¹⁸ Mit diesem militärstrategischen Wandel, der Ende der 1970er Jahre seinen Anfang nahm, wandelte sich auch die Kritikalität dieser Infrastrukturen: Als »force-enhancement applications« fanden Satelliten-Infrastrukturen wie das GPS-Navigationssystem bei amerikanischen Militäreinsätzen ab den 1980er Jahren Verwendung.¹⁹ Analog zur früheren Integration der Schienennetzwerke und Unterseekabel, erkannten Planer:innen in Verteidigungsministerien das Potential von Satelliten in der Kriegsführung.²⁰ So setzten die US-Streitkräfte u.a. GPS-Navigation zur maritimen Minenräumung im Persischen Golf 1988 sowie zur Zielführung von Marschflugkörpern im Golfkrieg 1991 ein.²¹ Ausgangs der 1980er Jahre war das Gros der im All befindlichen Satelliten – militärischer Natur – zu einer Infrastruktur der Kriegsführung adaptiert worden. Durch diesen militärtechnologischen Wandel wurden Satelliten selbst zu Zielen. Ihre Kritikalität gründete nicht länger nur auf die Relevanz für die Betreibernation, sondern auch auf ihr Bedrohungspotential für andere Staaten. Zur Sicherung der eigenen kritischen Infrastruktur musste der Weltraum aus militärischer Sicht kontrollierbar werden. Im Kalten Krieg bedeutete dies, der Gegenseite die Nutzung ihrer orbitalen Infrastruktur verwehren zu können.

Die Zerstörung von Satelliten stellte sich jedoch im Zusammenspiel mit orbitalen Mechaniken als Gefahr heraus: Heaphy beobachtete: »Anti-satellite (ASAT) weapons tests add to the dangerous quantity of space junk now in orbit.« Er fuhr fort: »In 1985 the US destroyed a functioning scientific research satellite in a test of its new air-launched ASAT.«²² Waffentests dieser Art waren nicht die alleinige Quelle von Weltraummüll. Nahezu jede Mission hinterließ größere und kleinere

ture Transition. Economy, War, Nature (= *Making Europe: Technology and Transformations, 1850-2000*), New York: Palgrave MacMillan 2015, S. 211–216.

16 Vgl. Stockholm International Peace Research Institute (Hg.): *World Armaments and Disarmament. SIPRI Yearbook 1982*, London: Taylor & Francis 1982, S. 292.

17 Vgl. D. v. Laak: Alles im Fluss, S. 13.

18 Vgl. A. Bateman: Weapons in Space, S. 24–27.

19 Vgl. Canan, James W.: »Space Gets Down to Earth«, in: *Air Force Magazine* (August 1990), S. 30–34, S. 32.

20 Vgl. P. Högselius/A. Kaijser/E. v.d. Vleuten: Europe's Infrastructure transition, S. 185, S. 221.

21 Vgl. Rip, Michael Russell: »The Precision Revolution. The Navstar Global Positioning System in the Second Gulf War«, in: *Intelligence and National Security* 9 (1994), S. 167–241, hier S. 173, S. 205.

22 J. Heaphy, »Space Age Pollution«, S. 21.

Überreste im All – beispielsweise Bolzen, Abdeckungen und Triebwerksstufen. Ausgediente Satelliten und Trümmerteile verbleiben je nach Höhe Tage bis hin zu Jahrzehnten auf Umlaufbahnen. Der von Heaphy genannte Ziel-Satellit stand durch einen Batterieschaden am Ende seiner Lebensdauer.²³ Konnten ausgediente Satelliten nicht in der Atmosphäre verglühen, rangierten die Raumfahrtagenturen sie auf Friedhof-Orbits – u.a. jene mit nuklearer Energiequelle – aus. Die aktive Zerstörung von Satelliten war damit die aufsehenerregendste Müllquelle.

Die infrastrukturelle Erschließung des erdnahen Orbits erfolgte größtenteils unter sicherheitspolitischem Kalkül. Ihre Verwendung und damit ihre Wahrnehmung als kritisch unterlag einer Ambivalenz: Aus Sicht der US-Regierungen garantierten sie staatliche Stabilität und dienten dem Erhalt einer militärtechnologischen Überlegenheit. Diese erreichte in den 1980er Jahren ihren Höhepunkt.²⁴ Die Kehrseite dieses Prozesses war die im Zusammenspiel mit extremen Umwelt-einflüssen entstandene Verschmutzung der Erdumlaufbahnen.

Zwischen Infrastrukturen und extremer Umwelt: Weltraummüll

Der Weltraum ist keine passive, leere Umwelt. Weltraumwetter – die Wechselwirkungen von Strahlung, Gravitation und Sonnenaktivität – sind natürliche Gegebenheiten des erdnahen Weltraums. Er lässt sich daher als extreme und lebensfeindliche Umwelt fassen, in der »any and all activity [of humans has to] be technologically mediated«. STS Scholars wie Katarina Damjanov haben deshalb betont, »[that] infrastructures do not merely expedite the encounters of earthlings with space. Rather, they are pivotal for making their space exploits possible.«²⁵ Damit steht der Weltraum als extreme Umwelt in enger Verbindung mit den irdischen Polar- und Tiefseegebieten. War die Erforschung und Erschließung der Polargebiete durch die gewonnenen Erfahrungen bereits eng mit der frühen Raumfahrt verknüpft, verbindet All und Tiefsee eine politische und ökonomische Wahrnehmung als Ressource, die nur durch Technologien erschließbar erschien.²⁶

23 Vgl. https://space.skyrocket.de/doc_sdat/solwind.htm.

24 Maßgeblichen Anteil daran hatte die ab 1983 verfolgte amerikanische Strategische Verteidigungsinitiative (SDI). Hierzu: A. Bateman: *Weapons in Space*.

25 Damjanov, Katarina: »Space Infrastructures and Networks of Control and Care«, in: Juan Francisco Salazar/Alice Gorman (Hg.), *The Routledge Handbook of Social Studies of Outer Space*, London: Routledge 2023, S. 328–338, hier S. 329.

26 Vgl. Gestwa, Klaus: »Polarisierung der Sowjetgeschichte. Die Antarktis im Kalten Krieg«, in: Osteuropa 61 (2011), S. 271–288. Herzberg, Julia/Kehrt, Christian/Torma, Franziska (Hg.): *Ice and Snow in the Cold War. Histories of Extreme Climatic Environments*, New York: Berghahn 2018.

Hier steht der erdnahe Weltraum als Umwelt mit Wirkungsmacht im Zentrum: An der Schmittstelle zwischen Infrastrukturen und extremer Umwelt entstanden Wechselwirkungen, deren deutlichste Variante der Weltraummüll ist. Umweltgeschichtliche Beiträge zur Erforschung des Mülls zeigten bereits, dass Infrastrukturen eine zentrale Rolle zum Ex- bzw. Import von Abfällen spielten.²⁷ Weltraummüll, so wird hier folgend gezeigt, ist das historische Resultat der infrastrukturellen Erschließung einer extremen Umwelt.

Um in der Raumfahrt hoch hinauszukommen, wird stets ausreichend Schub benötigt, um die Schwerkraft zu überwinden. Die »Space Age Pollution« begann, Heaphy folgend, somit bereits bei den Starts von Trägerraketen. Mit Zunahme der Raumfahrt entstanden Weltraumbahnhöfe als technische Umwelten. Diese grundlegenden Bodensegmente einer jeden Satelliteninfrastruktur zeichneten sie sich auch in besonderem Maße durch ihre Verschmutzung aus, was Jim Heaphy am Beispiel Vandenberg's anmahnte:

»A new Air Force space shuttle launch complex, scheduled to begin operations at Vandenberg in 1992, promises environmental and social problems of surprising magnitude. Each space shuttle launch [...] will create about eight million pounds of toxic waste in form of water contaminated with hydrochloric acid.«²⁸

Vandenberg, etwa 95 Kilometer nordwestlich von Santa Barbara in Kalifornien gelegen, war und ist neben Cape Canaveral in Florida der zweite Weltraumbahnhof der USA. An der Pazifikküste gelegen, startete hier besonders die US-Luftwaffe militärische Satelliten. Die geografische Lage der Startplätze beeinflusste, welche Umlaufbahnen erreichbar waren: Nahe dem Äquator war der geostationäre Orbit leicht zu erreichen, die polare Umlaufbahn benötigte hingegen einen Startplatz weiter nördlich oder südlich – Vandenberg erfüllte letzteres Kriterium. Der Umstand um die toxischen Beiprodukte eines Shuttle-Starts wurde schon seit 1982 in Florida beobachtet: Die Überwindung der Schwerkraft gelang hier mit einem Treibstoffmix aus Stickstoff und Aluminium, dessen Verbrennung die von Heaphy beschriebenen Endprodukte erzeugte. Der Shuttle-Startplatz in Kalifornien sollte polare Umlaufbahnen erreichbar machen, auf welchen Aufklärungssatelliten die Sowjetunion ideal überfliegen konnten. Doch dazu kam es nicht. Im Zuge der Challenger-Katastrophe von 1986 suspendierten NASA und Pentagon zunächst alle Shuttle-Flüge. Ursächlich für die Katastrophe waren die Dichtungsringe der Zusatzzraketen, die bei niedrigen Temperaturen undicht wurden. Am Tag des Starts im

27 Vgl. hierzu: Müller, Simone: »Dirty New Natures. Infrastructures and the Global Waste Economy«, in: Giacomo Bonan/Katia Occhi (Hg.), *Environment and Infrastructure: Challenges, Knowledge and Innovation from the Early Modern Period to the Present (= Studies Early Modern Contemporary European History, Band 6)*, Boston: DeGruyter 2023, S. 141–160.

28 J. Heaphy: »Space Age Pollution«, S. 20.

Januar 1986 trat so Raketentreibstoff unkontrolliert aus und brachte den gesamten Raumpendler 73 Sekunden nach Start zur Explosion. Obwohl Katastrophen dieser Größenordnung selten waren, sollten im Falle von Shuttle-Starts aus Vandenberg die nahegelegenen Ölförderplattformen vor Santa Barbara evakuiert werden.²⁹ Herabstürzende Raketenteile, besonders ausgebrannte Triebwerksstufen, gehörten zur üblichen Praxis der Raumfahrt. Durch das Zusammenspiel von Flugbahn und Erdrotation erfolgte der Fall dieser abgestoßenen Artefakte oft über Gebieten, die nicht Teil der raumfahrenden Nation waren.³⁰ Geografische Positionen stellten so trotz Verlassens der Erdatmosphäre stets einen Faktor dar.

Im All sind Satelliten nicht völlig losgelöst. Umlaufbahnen sind nicht beliebig, in ihrer extremen Umwelt haben Satelliten stets individuelle geografische Eigenschaften in Relation zur Erde.³¹ Hierbei haben äquatorgebundene und damit geostationäre Umlaufbahnen einen besonderen Wert für globale Kommunikation, Meteorologie und Frühwarnsysteme.³² Eine Geografie der Gravitation entstand, als das erdnahen All erschlossen wurde: Erst der Aufbau von Satelliteninfrastrukturen schrieb den unterschiedlich hohen Umlaufbahnen über dem Planeten gewisse Bedeutungen zu. LEO, MEO und GEO³³ wurden zu geografischen Orten, als die Infrastruktur den Raum zunehmend vernetzte.³⁴ Die Benennung bestimmter Umlaufhöhen entlang der Distanz zur Erde oder ihrer Eigenschaften in Relation zu ihr, grenzte die extreme Umwelt ein. Die entstandenen Regionen gaben den einzelnen, nicht-stillstehenden Infrastruktursegmenten *Satellit* feste Bezugspunkte. Weltraummüll hingegen wurde zunehmend als Form der Verschmutzung durch nicht-statische Objekte wahrgenommen.³⁵

Mit der Wiederaufnahme bemannter Raumflüge mit dem Shuttle Columbia 1981 landete Weltraummüll auf den Seiten der amerikanischen Tageszeitungen. Ein Artikel der New York Times klärte im April 1981 die Leser:innen zwei Tage nach Start des ersten Shuttles darüber auf, dass sich neben dem Raumpendler 1156 weitere

29 Vgl. ebd.

30 Vgl. Rand, Lisa Ruth: »Falling Cosmos: Nuclear Reentry and the Environmental History of Earth Orbit«, in: Environmental History 24 (2019), S. 78–103.

31 Vgl. Dunnett, Oliver: »The Spaces of Outer Space«, in: Salazar/Gorman, The Routledge Handbook of Social Studies of Outer Space (2023), S. 84–95, hier S. 90.

32 Vgl. ebd.

33 Abkürzung für Orbitalhöhen: *low-earth orbit* (200–2000 km), *medium earth orbit* (2000–36.000 km), *geostationary orbit* (35.786 km).

34 Vgl. Burchardt, Marian/Laak, Dirk van: »Introduction«, in: Dies. (Hg.), Making Spaces through Infrastructure, Berlin/Boston: De Gruyter 2023, S. V–VI.

35 Vgl. Hunter, Hanna/Nelson, Elizabeth: »Out of Place in Outer Space?«, in: Environment and Society 12 (2021), S. 227–245, hier S. 230.

Satelliten und über 3400 Weltraummüllobjekte in der Umlaufbahn befanden.³⁶ Die »Space Age Pollution«, wie Heaphy sie 1987 beschrieb, »poses an increasing threat to space vehicles. These cast-off fragments of space hardware pack quite a wallop, and the smaller pieces are almost impossible to track.«³⁷ Bereits 1978 hatte der NASA-Astrophysiker Donald Kessler während seiner Arbeit in der Abteilung für Umwelteinflüsse die Entstehung von Weltraummüll theoretisch nachgewiesen. Das nach ihm benannte Kessler-Syndrom zeigte, dass Kollisionen von Weltraummüll-Artefakten zunehmen würden, was die Gefahr einer Kettenreaktion erhöhte.³⁸ Daraufhin stieg er in der NASA zum Leiter der frisch geschaffenen Abteilung für Weltraummüll auf.³⁹

Das Wissen um die Problematik des Weltraummülls fand seinen Weg auch in das Militär. Die US-Luftwaffe überwachte seit Sputnik-I den erdnahen Weltraum mittels eines globalen Netzwerkes aus Radar- und Teleskopanlagen. Die so gewonnenen Daten liefen in einem Satellitenkatalog zusammen – dieser ist bis in die Gegenwart der umfangreichste seiner Art.⁴⁰ Weltraummüll war auch für das Militär eine wachsende Bedrohung. Heaphy formulierte eine für die 1980er Jahre existenzielle Bedrohungssituation: »Imagine the risks if a critical military satellite was suddenly destroyed by space junk during a time of international crisis.«⁴¹ Der Friedensaktivist imaginierte damit beispielsweise den Zusammenstoß eines Frühwarnsatelliten mit Weltraummüll, was eine der beiden Supermächte »blind« für einen Nuklearangriff gemacht hätte. Die Kritikalität der Infrastruktur wandelte sich unter Einbezug dieser Wissensbestände erneut. War militärisch zuvor davon auszugehen, eigene Satelliten wären in Krisen- und Kriegszeiten für einen Gegner ebenso Ziele wie die Infrastrukturen der Energieversorgung und Kommunikation, konnten sie nun jederzeit durch unabsichtliche Kollisionen gefährdet werden.

Die extreme Umwelt wirkte auch von weiter außerhalb auf die Dynamik zwischen Infrastruktur und Müll ein: Die Expansion der Erdatmosphäre bei hoher Sonnenaktivität führte eine Art Reinigungsprozess in niedrigen Umlaufbahnen herbei; Weltraummüll verglühte so in der Atmosphäre, während größere Fragmente auf die Erde stürzten.⁴² Diese Sonnenaktivitäten vollziehen sich zyklisch, alle elf

36 Vgl. Severo, Richard: »Thousands of Objects of ›Space Junk‹ in Earth Orbit«, in: *New York Times*, 14.04.1981, S. 6.

37 J. Heaphy: »Space Age Pollution«, S. 21.

38 Vgl. Kessler, Donald J./Cour-Palais, Burton: »Collision Frequency of Artificial Satellites. The Creation of a Debris Belt«, in: *Journal of Geophysical Research* 83 (1978), S. 2637–2646.

39 Vgl. <https://www.iafastro.org/biographie/donald-j-kessler.html>.

40 Siehe: <https://www.space-track.org>.

41 J. Heaphy: »Space Age Pollution«, S. 21.

42 Vgl. L. R. Rand: »Falling Cosmos«, S. 82–83.

und 22 Jahre erhöht sich die Strahlung der Sonne.⁴³ Nicht nur dehnt sich dadurch, wie Rand deutet, die Atmosphäre im niedrigen Orbit aus, sie führen mitunter auch zu Sonnenstürmen. Satelliten sind gegenüber einer elektromagnetischen Sturmflut besonders verwundbar: Schnell wurden beispielsweise während des Golfkrieges 1991 Funk- und GPS-Signalverbindungen gestört.⁴⁴ Bedrohlichstes Szenario bleibt die Wiederholung des Carrington-Ereignisses.⁴⁵ Für Satelliten in jeder Umlaufhöhe könnte dies zum Totalausfall und einer Verschiebung ihrer Bahnen führen; kaskadierende Kollisionen wären die Folge.⁴⁶ Die infrastrukturelle Erschließung des Orbits machte seine extreme Umwelt nicht kontrollierbarer. Vielmehr verstärkten extreme Umwelteinflüsse die Kritikalität von Infrastrukturen, auf deren reibungsloser Funktion nicht nur militärisch-staatliche Sicherheit, sondern auch Telekommunikation, Wettervorhersagen und Navigation fußen. Die Schnittstelle zwischen Infrastruktur und extremer Umwelt verweist somit auf ein systemisches Verständnis des erdnahen Weltraums – als »thick heliospheric ecology made up of dynamic material relationships«, das herkömmliche Vorstellungen eines bloß »thinly diagramed system of mathematically ordered objects« hinter sich lässt.⁴⁷

Zur Erfassung und Verfolgung von Objekten im All bestanden sowohl in den USA als auch in der UdSSR zivil-militärische Einrichtungen. Sie katalogisierten Satelliten und per Radar sichtbare Trümmer. Dies stellte den Versuch der Raumfahrtnationen dar, dem orbitalen Müllproblem zu begegnen. Besonders Objekte, die kleiner als zehn Zentimeter waren, entzogen sich jedoch meist der Beobachtung.⁴⁸ Bolzen, Schrauben und Splitter stellten sich demnach als *Known-Unknowns* dar:

43 Siehe hierzu: Usoskin, Ilya G.: »A History of Solar Activity over Millennia«, in: *Living Reviews in Solar Physics* 20, (2023), S. 1–113.

44 Vgl. Kabat, Brian W.: *The Sun as a Non-State Actor. The Implications on Military Operations and Theater Security of a Catastrophic Space Weather Event*, Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center 2010, S. 9.

45 Vgl. Lovett, Richard A.: »Was würde passieren, wenn heute der größte Sonnensturm aller Zeiten losbräche?«, in: *National Geographic*, 09.11.2017, <https://www.nationalgeographic.de/wissenschaft/was-wuerde-passieren-wenn-heute-der-groesste-sonnensturm-aller-zeiten-losbraeche>.

46 Vgl. Anonym: »Solar storms: Are We Ready for Another Carrington Event?« in: *The UN Agency for Digital Technologies*, 30.08.2024, <https://www.itu.int/hub/2024/08/solar-storms-are-we-ready-for-another-carrington-event-2/>.

47 Olson, Valerie: »NEOecology. The Solar System's Emerging Environmental History and Politics«, in: Dolly Jørgensen/Finn Arne Jørgensen/Sara B. Pritchard (Hg.), *New Natures: Joining Environmental History with Science and Technology Studies*, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press 2013, S. 195–271, hier S. 211.

48 Vgl. Jackson, Phoebe A.: »Small Satellite Debris Catalog Maintenance Issues«, in: R. T. Savelly (Hg.), *Fourth Annual Workshop on Space Operations Applications and Research (SOAR '90)*, Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration 1991, S. 696–704, hier S. 698.

Akteure in Wissenschaft und Behörden wussten um ihre Existenz, aber nicht um ihre Position oder Schadenswirkung. Teils entgegenwirken konnte die NASA dieser Unsicherheit mit dem »Long Duration Exposure Facility Experiment«. Hierbei handelte es sich um einen Satelliten, der neben anderen Langzeitexperimenten die Wirkung von Weltraummüll durch Einschläge dokumentieren sollte. Nach sechs Jahren im Orbit brachte das Shuttle das LDEF 1990 zurück auf die Erde. Die Auswertung der Anzahl und Größe der Einschläge in den Satelliten zeigte, dass Einschläge von großen Objekten mit höherer Wahrscheinlichkeit eintraten als angenommen.⁴⁹ Hatte die US-Regierung bereits 1988 der Anspruch, Weltraummüll bei jeglicher Aktivität im All zu minimieren,⁵⁰ sorgte das Ende des Kalten Krieges für einen massiven Wandel in der Raumfahrtlandschaft. Eine ab 1993 einsetzende, besonders durch die Regierung Clinton betriebene Liberalisierung des Raumfahrtsektors sorgte für den Aufstieg kommerzieller Unternehmen.⁵¹

Die orbitale Infrastruktur brachte nicht nur eine umfassende Verschmutzung ihrer Umwelt mit sich. Seit 1957 wurden 14.500 Tonnen an Objekten ins All gebracht, wovon etwa 3000 inaktive Satelliten immer noch die Erde umkreisen.⁵² In dieser Hinsicht sind Satelliten-Infrastrukturen zweifache Zeitspeicher.⁵³ Einerseits waren diese Satelliten größtenteils unter den politischen Ansprüchen des Kalten Krieges entwickelt und gestartet worden. Andererseits wirken sie durch ihre Persistenz – ob aktiv oder als Weltraummüll – in die Zukunft: Die Möglichkeit für extreme Weltraumwetter ist gegeben, sollten sie eintreten, wirken sich »alte« Technik und persistenter Weltraummüll fatal auf die Zukunft aus. Über die Zukunft schrieb Jim Heaphy 1987, »People everywhere [...] look at the future with a combination of hope and fear. They know that technology [...] is destined to play a big part in the human adventure.«⁵⁴

49 Vgl. Meshishnek, Michael J. et al.: Long Duration Exposure Facility (LDEF) Experiment M003: Meteoroid and Debris Survey, NASA, Langley Research Center 1993, S. 413.

50 Vgl. Ostovar, Michele: »Presidential Directive on National Space Policy, February 11, 1988«, in: NASA History Communications Lead, 11.02.1988, <https://www.nasa.gov/history/presidential-directive-on-national-space-policy-february-11-1988/>

51 Vgl. Moltz, James Clay: The Politics of Space Security. Strategic Restraint and the Pursuit of National Interests, Redwood City: Stanford University Press³ 2019, S. 237.

52 Nach Auswertung des *space-track*-Kataloges. ESA: Space Environment Statistics: <https://sdu.p.esoc.esa.int/dicosweb/statistics/>

53 Vgl. Engels, Jens Ivo: »Infrastrukturen als Produkte und Produzenten von Zeit«, in: NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin 28/1 (2020): 69–90, <https://doi.org/10.1007/s00048-019-00234-7>

54 J. Heaphy: »Space Age Pollution«, S. 21.

Schluss

Im kenianischen Mukuku zeigte sich eingangs, dass Weltraummüll die deutlichste Auswirkung von Satelliten-Infrastrukturen ist. Ohne die Gravitation wäre diese historisch bedingte Verschmutzung auf beiden Seiten der Atmosphäre unsichtbar geblieben. Die durch Satelliten entstandene Verbindung mit dem Weltraum verdeutlicht die *agency* des Alls: Technologie ermöglichte zwar die Interaktion mit dieser Umwelt, sie musste aber stets an die Bedingungen im All angepasst werden. Im All gingen zivile und militärische Anwendungen Hand in Hand: Beide hatten den Blick nach ›unten‹ auf die Erde gerichtet. Durch Infrastrukturen rekonfigurierte sich nicht nur die extreme Umwelt im All, sondern auch Gebiete auf der Erde durch ihre ›Nähe‹ zu den Umlaufbahnen. Die Nutzung des Alls vollzog sich damit nicht ausschließlich im Orbit, sondern auch an Startrampen und Empfangsstationen. Als Umwelt bleibt der Weltraum eine extreme, abstrakte und schwer zu erreichende Sphäre. Mit der Betrachtung des Weltalls als extreme Umwelt und Satelliten als kritische Infrastrukturtechnologie lässt sich die Schnittstelle zwischen technik- und umwelthistorischer Forschung jedoch erkenntnisreich verbinden.

Die Genese von Satelliten-Infrastrukturen hat vielfältige Spuren an ihren Ausgangsorten und vor allem im Weltraum hinterlassen. Dabei scheint es stets die Extreme des Alls zu sein, die durch menschengemachte und natürliche Faktoren diese bedrohen. Doch nicht nur das Weltall gefährdet diese kritischen Infrastrukturen. Der menschengemachte Klimawandel, der Extremwetter befeuert, beschädigt Bodeninstallationen wie das pazifische US-Gebiet Kwajalein: Steigende Meeresspiegel sowie Extremwetter bedrohen die Einrichtung und beschädigten diese zuletzt im Januar 2024 schwer.⁵⁵ Die Schwerkraft der Erde zieht nicht nur Objekte aus dem Orbit zurück, sie bringt auch die historische Perspektive auf eine sich zunehmend extrem wandelnde irdische Umwelt zurück zum Boden. Gravity always wins.

55 Vgl. Altman, Howard: »Reagan Test Site Damage from Massive Waves Seen in Imagery«, in: The War Zone, 24.01.2024, <https://www.twz.com/reagan-test-site-damage-from-massive-waves-seen-in-imagery>.