

García Alía u. a. – „The HEARTS EU Project and Its Initial Results on Fragmented High-Energy Heavy-Ion Single-Event Effects Testing“

1962: Der erste Kommunikationssatellit startet am 10. Juli von Cape Canaveral aus und ist ein voller Erfolg. Telstar 1 überträgt die ersten Live-Fernsehbilder zwischen den USA und Europa – die Grenzen der Welt schrumpfen. Doch die Euphorie verfliegt schnell. Bereits im Herbst beginnt der 60-Millionen-Dollar-Gigant, Befehle zu ignorieren. Den Ingenieuren im Kontrollzentrum steht der kalte Schweiß auf der Stirn: Was greift die empfindlichen Schaltkreise an? Manchmal muss ein Befehl dreimal wiederholt werden. Trotz verzweifelter, genialer Wiederbelebungsversuche, die den Satelliten kurz reaktivieren, kommt am 21. Februar 1963 das unvermeidliche Ende: Telstar 1 wird für immer stumm. Totalausfall!

1962: Der erste Kommunikationssatellit startet am 10. Juli von Cape Canaveral aus und ist ein voller Erfolg. Telstar 1 überträgt die ersten Live-Fernsehbilder zwischen den USA und Europa – die Grenzen der Welt schrumpfen. Doch die Euphorie verfliegt schnell. Bereits im Herbst beginnt der 60-Millionen-Dollar-Gigant, Befehle zu ignorieren. Den Ingenieuren im Kontrollzentrum steht der kalte Schweiß auf der Stirn: Was greift die empfindlichen Schaltkreise an? Manchmal muss ein Befehl dreimal wiederholt werden. Trotz verzweifelter, genialer Wiederbelebungsversuche, die den Satelliten kurz reaktivieren, kommt am 21. Februar 1963 das unvermeidliche Ende: Telstar 1 wird für immer stumm. Totalausfall!



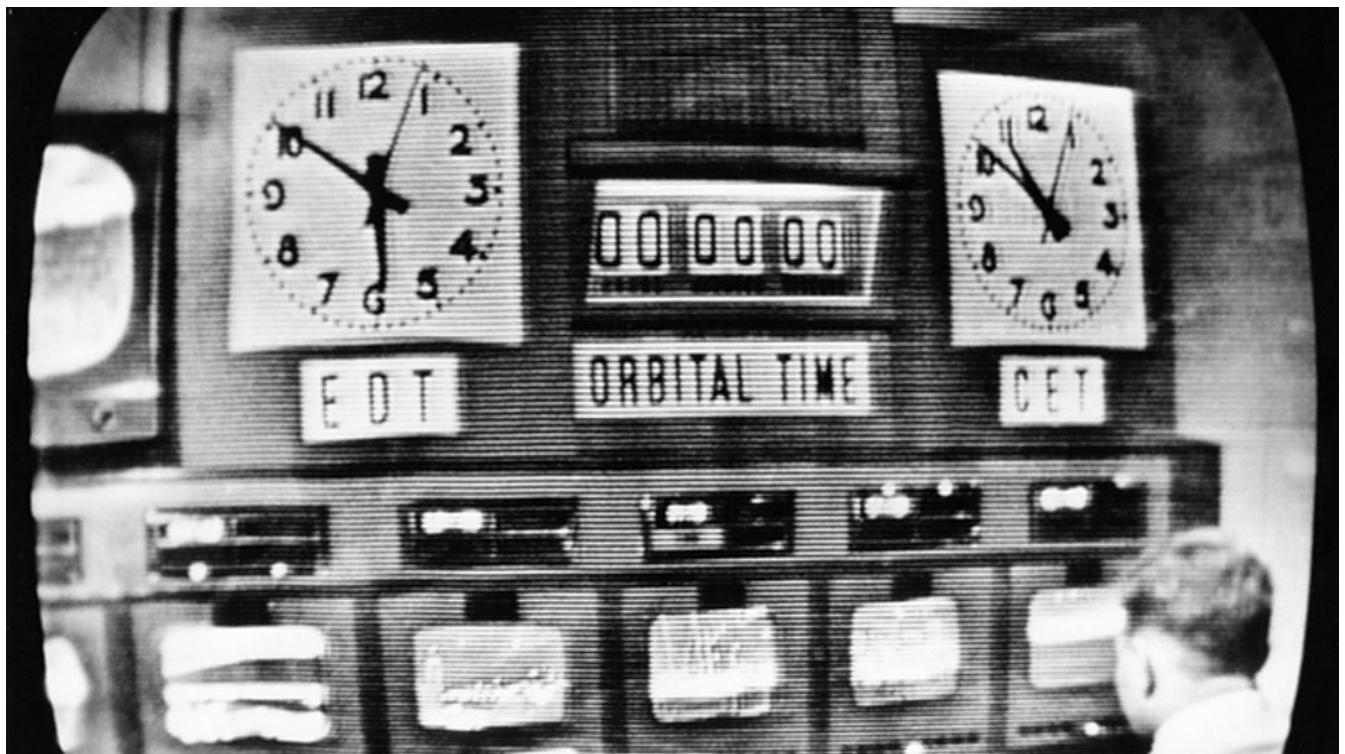
Datei:Delta Rocket Telstar1.jpg – Public domain. Accessed 2025-11-27

1962: Der erste Kommunikationssatellit startet am 10. Juli von Cape Canaveral aus und ist ein voller Erfolg. Telstar 1 überträgt die ersten Live-Fernsehbilder zwischen den USA und Europa – die Grenzen der Welt schrumpfen. Doch die Euphorie verfliegt schnell. Bereits im Herbst beginnt der 60-Millionen-Dollar-Gigant, Befehle zu ignorieren. Den Ingenieuren im Kontrollzentrum steht der kalte Schweiß auf der Stirn: Was greift die empfindlichen Schaltkreise an? Manchmal muss ein Befehl dreimal wiederholt werden. Trotz verzweifelter, genialer Wiederbelebungsversuche, die den Satelliten kurz reaktivieren, kommt am 21. Februar 1963 das unvermeidliche Ende: Telstar 1 wird für immer stumm. Totalausfall!



SN/GFDUNT (Adobe Stock) – File no.: 174965630. Accessed 2025-11-27

1962: Der erste Kommunikationssatellit startet am 10. Juli von Cape Canaveral aus und ist ein voller Erfolg. Telstar 1 überträgt die ersten Live-Fernsehbilder zwischen den USA und Europa – die Grenzen der Welt schrumpfen. Doch die Euphorie verfliegt schnell. Bereits im Herbst beginnt der 60-Millionen-Dollar-Gigant, Befehle zu ignorieren. Den Ingenieuren im Kontrollzentrum steht der kalte Schweiß auf der Stirn: Was greift die empfindlichen Schaltkreise an? Manchmal muss ein Befehl dreimal wiederholt werden. Trotz verzweifelter, genialer Wiederbelebungsversuche, die den Satelliten kurz reaktivieren, kommt am 21. Februar 1963 das unvermeidliche Ende: Telstar 1 wird für immer stumm. Totalausfall!



BBC – First Live Television Transmission from the US via Telstar Satellite

1962: Der erste Kommunikationssatellit startet am 10. Juli von Cape Canaveral aus und ist ein voller Erfolg. Telstar 1 überträgt die ersten Live-Fernsehbilder zwischen den USA und Europa – die Grenzen der Welt schrumpfen. Doch die Euphorie verfliegt schnell. Bereits im Herbst beginnt der 60-Millionen-Dollar-Gigant, Befehle zu ignorieren. Den Ingenieuren im Kontrollzentrum steht der kalte Schweiß auf der Stirn: Was greift die empfindlichen Schaltkreise an? Manchmal muss ein Befehl dreimal wiederholt werden. Trotz verzweifelter, genialer Wiederbelebungsversuche, die den Satelliten kurz reaktivieren, kommt am 21. Februar 1963 das unvermeidliche Ende: Telstar 1 wird für immer stumm. Totalausfall!

Space Radiation Effects in Electronics

Weltraumstrahlungseffekte in der Elektronik

Florian Marius Adamczyk

28. November 2025

Justus-Liebig-Universität Gießen

Modul **Wissenschaftliches Präsentieren** bei

Prof. Dr. Derck Schlettwein, PD Dr. Daniel Ebeling, Dr. Ulrike Nespoli

Themavergabe und Betreuer: **Dr. Roman Bergert**

Gliederung

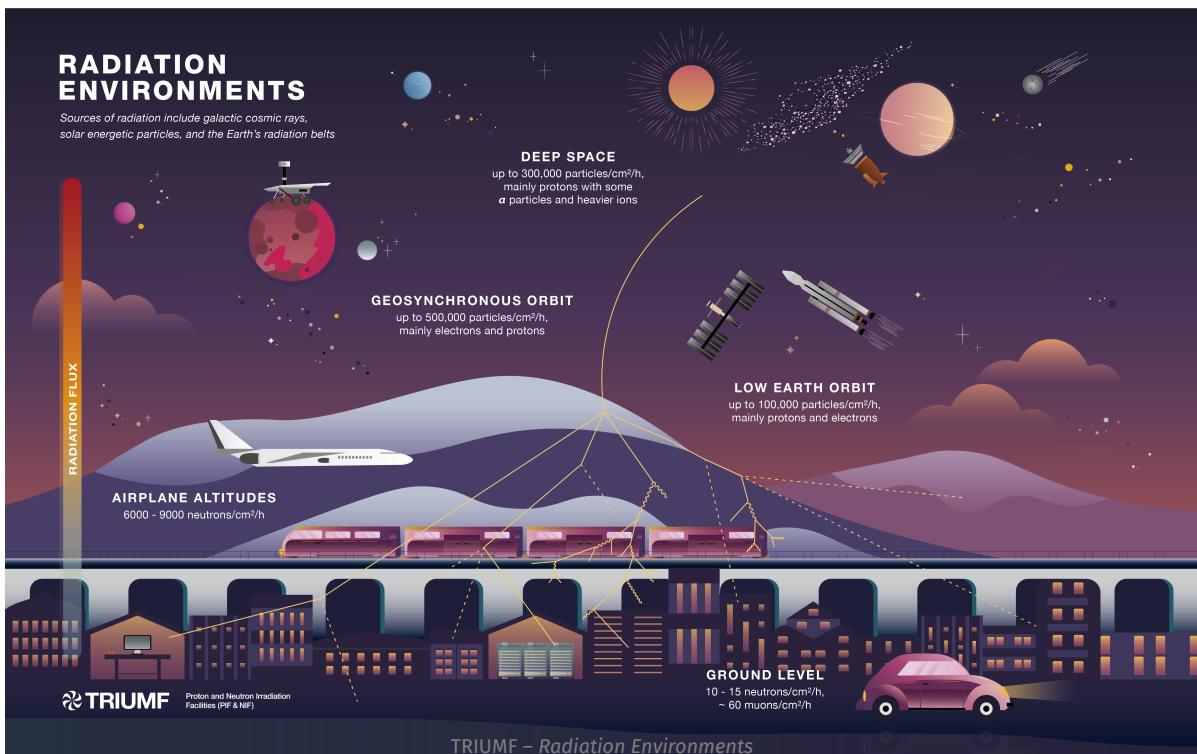
Einordnung der Strahlungseffekte

Kategorie	Kumulative Effekte	Single Event Effects
Beispiele	TID, DDD	SEU, SEL, SEB, SEGR
Zeitverhalten	langsam, dosisabhängig	Einzelereignisse, spontan
Typische Folgen	Parameterverschiebung, Degradation	Bitflips, Latchup, Zerstörung

- **TID/DDD:** Dosis akkumuliert ⇒ Bauteil driftet aus Spezifikation
- **SEE:** Einzelne Partikel ⇒ unmittelbare, oft sporadische Fehler
- Fokus dieser Präsentation: **TID** in MOS- und integrierten Bauteilen

Strahlungseffekte in Elektronik lassen sich grob in zwei Klassen einteilen. Erstens die kumulativen Effekte: Total Ionizing Dose und Displacement Damage. Hier zählt die aufsummierte Dosis – Parameter wie die Schwellenspannung verschieben sich langsam, bis das Bauteil nicht mehr innerhalb der Spezifikation arbeitet. Zweitens die Single Event Effects: einzelne Partikel können spontan Bitflips oder sogar destruktive Ereignisse wie Latchup auslösen. Heute konzentrieren wir uns auf die TID, also die kumulative Wirkung der Ionisation.

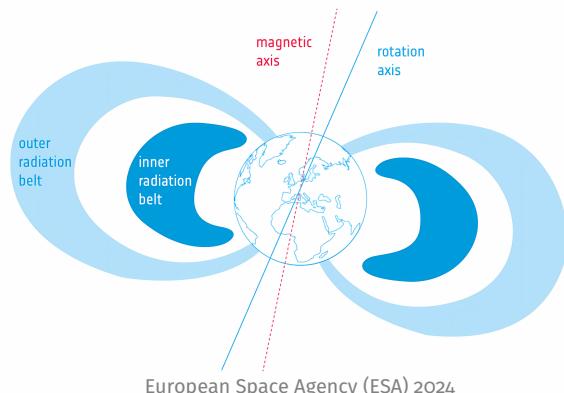
Strahlendosen im Vergleich



Strahlungsquellen im Weltraum

Strahlungsquellen:

- Sonne: solare Protonenereignisse, solare Teilchenstrahlung
- Van-Allen-Gürtel: gefangene Protonen und Elektronen
- GCR: hochenergetische schwere Ionen (geringer Fluss)
- Relevanz für TID:
 - Elektronen und Protonen \Rightarrow dominanter Beitrag zur TID
 - Photonen/sekundäre Elektronen \Rightarrow ergänzender Beitrag

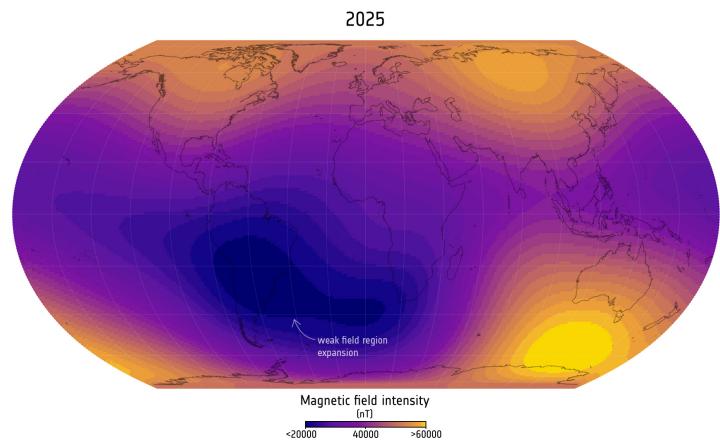


Die Strahlungsumgebung im Orbit wird im Wesentlichen von drei Quellen bestimmt: von der Sonne mit ihren solaren Protonenereignissen, von den Van-Allen-Gürteln mit gefangenen Protonen und Elektronen sowie von der galaktischen kosmischen Strahlung aus dem interstellaren Raum. Für die Total Ionizing Dose sind vor allem Elektronen und Protonen relevant, da sie langfristig Ladung in den Oxiden unserer Bauteile erzeugen. Photonen und sekundäre Elektronen tragen ebenfalls bei, aber die Van-Allen-Gürtel und besonders die Südatlantische Anomalie sind für einen LEO-Satelliten meist die dominanten TID-Quellen.

Van-Allen-Gürtel & SAA als TID-Hotspots

Südatlantische Anomalie (SAA):

- Lokaler Erdmagnetfeld-Einbruch
- Erhöhte Flüsse von MeV-Protonen und -Elektronen
- Satelliten in LEO: wiederholte Durchflüge ⇒ Dosis akkumuliert
- Typisch: TID über Missionsdauer 10–100 krad(Si) (missionsabhängig)



European Space Agency (ESA) 2025

Die Van-Allen-Gürtel sind keine homogene Schicht um die Erde, sondern haben lokale Besonderheiten. Besonders kritisch ist die Südatlantische Anomalie, wo das Magnetfeld geschwächt ist und der innere Protonengürtel viel näher an die Erde heranreicht. Satelliten in niedrigen Orbits durchqueren diese Region regelmäßig, bekommen dabei erhöhte Flußraten von MeV-Protonen und -Elektronen ab und sammeln so über Monate und Jahre eine beträchtliche Totaldosis. Je nach Orbit und Abschirmung liegen wir hier schnell im Bereich von zig krad in Silizium.

MOS-Querschnitt & Grundprinzip der Ionisation

Ionisation im Oxid:

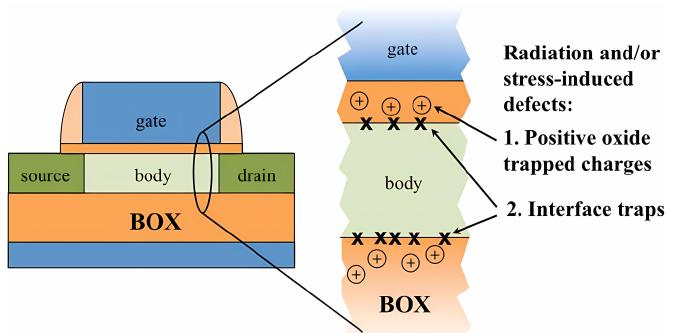
- Strahlung erzeugt Elektron-Loch-Paare in SiO_2

• Drift im elektrischen Feld:

- Elektronen: hohe Mobilität
⇒ fliehen schnell
- Löcher: sehr geringe Mobilität
⇒ werden eingefangen

• Defektstellen/Traps:

- Intrinsische Oxiddefekte (Oxygen Vacancies, E'-Center)
- Fangen bevorzugt Löcher
⇒ positive Oxidladung



Sanchez Esqueda, Barnaby und M. King 2015

⇒ Aufbau einer persistenten positiven Raumladung im Oxid

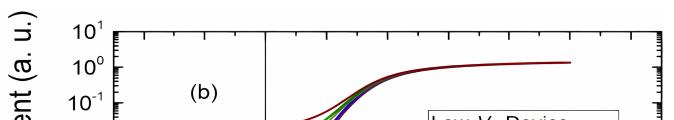
⇒ **Verschiebung der Threshold-Spannung**
(NMOS: $V_{th} \downarrow$, PMOS: $V_{th} \uparrow$)

Wir schauen uns den TID-Mechanismus direkt im MOS-Transistor an. Entscheidend ist: Der Schaden spielt sich fast komplett im Isolator, also dem Gate-Oxid, ab. Trifft ionisierende Strahlung das Oxid, entstehen Elektron-Loch-Paare. Elektronen sind sehr beweglich und verschwinden schnell. Löcher dagegen sind in SiO₂ etwa 10.000-mal weniger mobil und werden in vorhandenen Oxiddefektstellen festgehalten. Diese Defektstellen entstehen bei der Oxidherstellung. Dort bleiben Löcher langfristig stecken. Dadurch bildet sich eine positive Ladungsschicht im Oxid, die den Transistor elektrisch umprogrammiert: Im NMOS bedeutet das, dass der Transistor zu früh schaltet – V_{th} sinkt.

Gesamtwirkung im MOSFET

Effekte auf Transistor:

- Positive Oxidladung $\Rightarrow V_{th}$ sinkt



Wenn wir die I-V-Kennlinien eines nMOS vor und nach einer hohen Totaldosis vergleichen, sehen wir drei Merkmale: Die Schwellenspannung ist nach links verschoben – der Transistor schaltet früher durch. Und der Leckstrom im Sperrbereich ist deutlich erhöht. Bei pMOS-Transistoren ist die Situation qualitativ ähnlich, aber mit umgekehrten Vorzeichen bei der Schwellenspannungsverschiebung.

Funktionale Konsequenzen in Schaltungen

Auswirkungen auf Schaltungsebene:

- V_{th} -Drift \Rightarrow **Timing-Änderungen**, langsamere Schaltzeiten
- Erhöhter Leckstrom \Rightarrow **höherer Ruhestrom**, Wärmeentwicklung
- Mismatch in **Anologschaltungen**:
 - Offsetspannungen
 - Verstärkungsänderungen
- Langfristig: **Drift aus Spezifikation**, Funktionsausfall

Digitale Schaltungen:

- Verschobene Logikpegel \Rightarrow schlechter Noise-Margin
- Timing-Margen nicht mehr eingehalten
- Kritisch ansteigende Ruheströme

Die beschriebenen Parameteränderungen übersetzen sich auf Schaltungsebene direkt in funktionale Probleme. In digitalen Schaltungen können verschobene Schwellenspannungen und erhöhte Leckströme dazu führen, dass Timing-Margen nicht mehr eingehalten werden oder Ruheströme kritisch ansteigen. In analogen Schaltungen verschieben sich Verstärkungen, Offsets und Rauschverhalten. Über die Lebensdauer hinweg driftet das Bauteil so weit aus der Spezifikation, dass es seine Aufgabe im System nicht mehr zuverlässig erfüllen kann – genau das ist das Wesen des TID-Schadens.

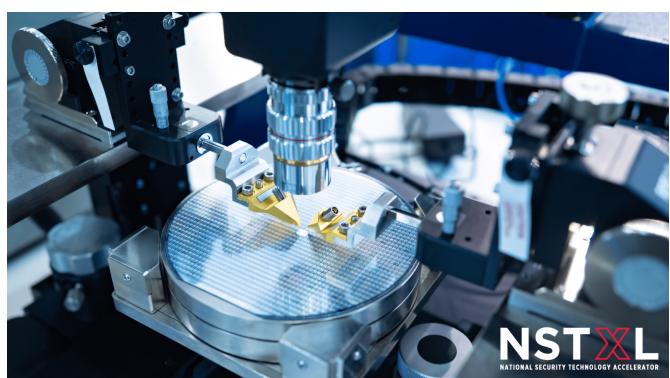
TID-Härtungstests und Qualifikationsverfahren (RHA)

Radiation Hardness Assurance:

- COTS-Bauteile meist nicht für Raumstrahlung entwickelt
- **RHA:** Nachweis, dass Bauteile unter Missionsdosis funktionieren
- TID ist eines der ersten Screening-Kriterien

Zielgrößen:

- ΔV_{th} , Verstärkung, Leckströme
- Funktionsgrenzen (LOGIC “0/1”, analoge Spezifikationen)



calebnstxl 2022

Bevor man ein Bauteil in einen Satelliten baut, muss klar sein, ob es die erwartete Strahlungsumgebung übersteht. Die Radiation Hardness Assurance beschreibt den Prozess, mit dem wir das absichern. TID ist dabei ein sehr grundlegendes Kriterium, weil es nahezu alle Technologien betrifft. Wir schätzen zunächst die Missionsdosis im Orbit ab, legen daraus ein Testdosisniveau mit Sicherheitsmarge fest und überprüfen dann, ob die relevanten elektrischen Parameter und die Funktion des Bauteils innerhalb dieser Dosis im zulässigen Rahmen bleiben.

TID-Testquellen & Randbedingungen

Strahlungsquellen:

- **Co-60-Gammastrahler** (1.17, 1.33 MeV)
- **Elektronen** ($E \geq 1$ MeV)

Gründe für diese Quellen:

- Hohe **Penetration** \Rightarrow homogene Dosis im Bauteil
- Geringe **Displacement Damage**-Komponente

Testbedingungen (nach ESCC 22900 u.Ä.):

- Raumtemperatur, Bestrahlung in Luft möglich
- Dosisratenbereich z.B. 36 rad/h – 180 krad/h
- **Charged-Particle Equilibrium** sicherstellen
- Co-60: Abschirmung $\sim 1,5$ mm Pb + 0,7 mm Al (Low-E-Tail-Reduktion)

In der Praxis nutzt man für TID-Tests vor allem Co-60-Gammastrahler oder Elektronenquellen mit Energien oberhalb von einem MeV. Diese Strahlung dringt tief genug in das Bauteil ein, um eine annähernd homogene Dosis in den empfindlichen Volumina zu erzeugen, ohne nennenswerte Verlagerungsschäden zu verursachen. Normen wie die ESCC 22900 geben Bereiche für die Dosisrate und konkrete Anforderungen an das Strahlungsfeld vor – zum Beispiel die Notwendigkeit, ein Gleichgewicht geladener Teilchen herzustellen und den niederenergetischen Anteil des Co-60-Spektrums durch Blei- und Aluminiumabschirmung zu unterdrücken.

Dosisrate, ELDRS & Testablauf

Dosisrate:

- Einfluss auf Defektkinetik und Trapping
- **ELDRS:** Enhanced Low Dose Rate Sensitivity (v.a. Bipolar/BCD)

Typischer Testablauf:

- Bauteil charakterisieren (**Pre-Irradiation**)
- Bestrahlen in **Dosisinkrementen** (z.B. 10 krad-Schritte)
- Nach jedem Inkrement: **Messung im strahlungsfreien Zustand**
- Endpunkt: spezifizierte **Qualifikationsdosis** + Margin

Hinweis:

- Für TID: **keine kontinuierliche dynamische Überwachung** nötig
- Fokus auf **parametrische Drift** und Funktionsgrenzen

Die Dosisrate ist ein kritischer Parameter im TID-Test, weil sie die zeitliche Dynamik der Defektentstehung und -heilung beeinflusst. Besonders in bipolaren Technologien gibt es den ELDRS-Effekt, bei dem das Bauteil bei niedrigen Dosisraten stärker degradiert als bei hohen. In einem typischen TID-Test vermisst man das Bauteil zunächst vor der Bestrahlung, setzt es dann in mehreren Dosisinkrementen der Strahlung aus und führt zwischen den Inkrementen im strahlungsfreien Zustand Messungen durch. So zeichnet man die parametrierte Drift als Funktion der akkumulierten Dosis nach. Eine kontinuierliche, dynamische Überwachung während der Bestrahlung ist für TID in der Regel nicht notwendig.

Kernaussageen

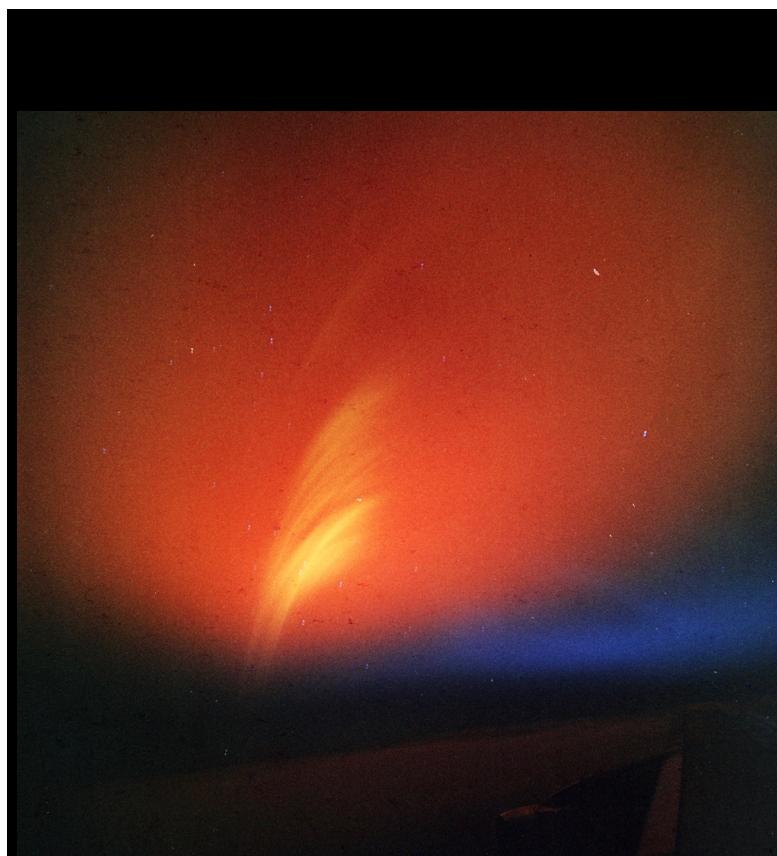
Zusammenfassung:

- **TID** = kumulative Ionisationsschäden in Oxiden & Grenzflächen
- Hauptmechanismus:
 - **Oxid-trapped charge** (positive Raumladung)
- Folgen:
 - ΔV_{th} , Mobility-Degradation, Leckstrom↑
 - Drift aus Spezifikation bis zum **Funktionsverlust**
- **RHA/TID-Tests** sind unverzichtbar für Raumfahrt-Elektronik



HEARTS 2025

Die Total Ionizing Dose ist kein exotischer Randaspekt, sondern ein zentraler, kumulativer Schädigungsmechanismus in der Raumfahrt elektronik. Sie entsteht durch Ionisation im Gate-Oxid und an der Si-SiO₂-Grenze, führt über Oxid-trapped charge und Interface States zu Schwellenspannungsverschiebungen, Mobilitätsverlust und erhöhten Leckströmen und lässt Bauteile langfristig aus der Spezifikation drifteten. TID-Tests im Rahmen der Radiation Hardness Assurance sind deshalb ein Muss für jede ernst zunehmende Weltraummission.



Atomic Archive – Operation Fishbowl | Starfish Prime (1962)

...Und damit, wissen wir nun, was damals beim Telstar 1 Satellit passiert ist: Die Ursache für das Scheitern war der sogenannte kumulative Strahlungsschaden (TID). Hochenergetische Partikel griffen die empfindlichen Transistoren in den Kommando-Decodern des Satelliten an und zerstörten ihre Funktion. Das Drama: Obwohl Telstar 1 robust gegen die natürliche Strahlung der Van-Allen-Gürtel geschützt war, überlebte er die wahre Bedrohung nicht. Am Tag vor dem Start hatte der atomare Test Starfish Prime einen künstlichen, tödlich verstärkten Strahlungsgürtel geschaffen, der die Lebensdauer des bahnbrechenden Satelliten abrupt beendete.

Q & A

Mögliche Diskussionspunkte:

- Unterschiede **TID vs. DDD vs. SEE**
- **Mitigation:** RadHard-by-Design, Shielding, Technologieauswahl
- Bezug zu **aktuellen Missionen / COTS im All**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Damit bin ich am Ende der inhaltlichen Präsentation und freue mich auf Ihre Fragen. Wir können gern noch vertiefen, wie sich TID von anderen Strahlungseffekten abgrenzt, welche Design- und Technologie-Strategien es zur Härtung gibt oder wie moderne Missionen mit dem Einsatz von COTS-Bauteilen im All umgehen.

Literaturverzeichnis i

-  Atomic Archive (2024). ***Operation Fishbowl | Starfish Prime (1962)***.
AtomicArchive.com. Yield: 1.4 Megatons; Location: Johnston Island area — high altitude (tens of miles); Event date: July 9, 1962. Accessed 2025-11-27. URL: <https://www.atomicarchive.com/media/photographs/testing/us/fishbowl/fishbowl-8.html>.
-  BBC (2024). ***First Live Television Transmission from the US via Telstar Satellite***.
BBC.com. Accessed 2025-11-28. URL:
<https://www.bbc.com/historyofthebbc/anniversaries/july/telstar-satellite>.
-  calebnstxl (März 2022). ***Strengthening Electronic Reliability through Radiation Hardening - NSTXL***. NSTXL. Accessed 2025-11-28. URL:
<https://nstxl.org/reliability-through-radiation-hardening/>.

Literaturverzeichnis ii

-  European Space Agency (ESA) (Dez. 2024). **Radiation Rangers: What Two Mannequins Learned on Artemis I - Orion Blog.** blogs.esa.int/orion. Accessed 2025-11-28. URL: <https://blogs.esa.int/orion/2024/12/04/radiation-rangers-what-two-mannequins-learned-on-artemis-i/>.
-  — (Okt. 2025). **South Atlantic Anomaly 2025 Compared to 2014.** ESA.int / ESA Multimedia - Images. Credit: ESA (Data source: Finlay, C.C. et al., 2025). Licence: ESA Standard Licence. Accessed 2025-11-28. URL: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2025/10/South_Atlantic_Anomaly_2025_compared_to_2014.

Literaturverzeichnis iii

-  García Alía, Rubén u. a. (Apr. 2025). „**The HEARTS EU Project and Its Initial Results on Fragmented High-Energy Heavy-Ion Single-Event Effects Testing**“. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 72.4, S. 1040–1049. ISSN: 1558-1578. DOI: 10.1109/TNS.2025.3530502.
-  Gemeinfrei (o. D.). **Datei:Delta Rocket Telstar1.jpg.** Wikimedia Commons. Public domain. Accessed 2025-11-27. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46898>.
-  HEARTS (2025). **Challenges.** HEARTS Project. Accessed 2025-11-28. URL: <https://hearts-project.eu/challenges/space-radiation-environment/>.

Literaturverzeichnis iv

- King, M. P. u. a. (2017). „**Analysis of TID Process, Geometry, and Bias Condition Dependence in 14-nm FinFETs and Implications for RF and SRAM Performance**“. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 64.1, S. 285–292. DOI: 10.1109/TNS.2016.2634538.
- Sanchez Esqueda, Ivan, H.J. Barnaby und M King (Juni 2015). „**Compact Modeling of Total Ionizing Dose and Aging Effects in MOS Technologies**“. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 62. DOI: 10.1109/TNS.2015.2414426.

Literaturverzeichnis v

- SN/GFDUNT (Adobe Stock) (2025). **Telstar 1 - the World's First Transatlantic Broadcast Satellite, Launched in 1962.** Adobe Stock (Stock-Illustration). File no.: 174965630. Accessed 2025-11-27. URL: https://stock.adobe.com/de/images/telstar-1-the-world-s-first-transatlantic-broadcast-satellite-launched-in-1962/174965630?prev_url=detail.
- TRIUMF (2021). **Radiation Environments.** Triumf.ca. Accessed 2025-11-28. URL: <https://radenv.triumf.ca/>.