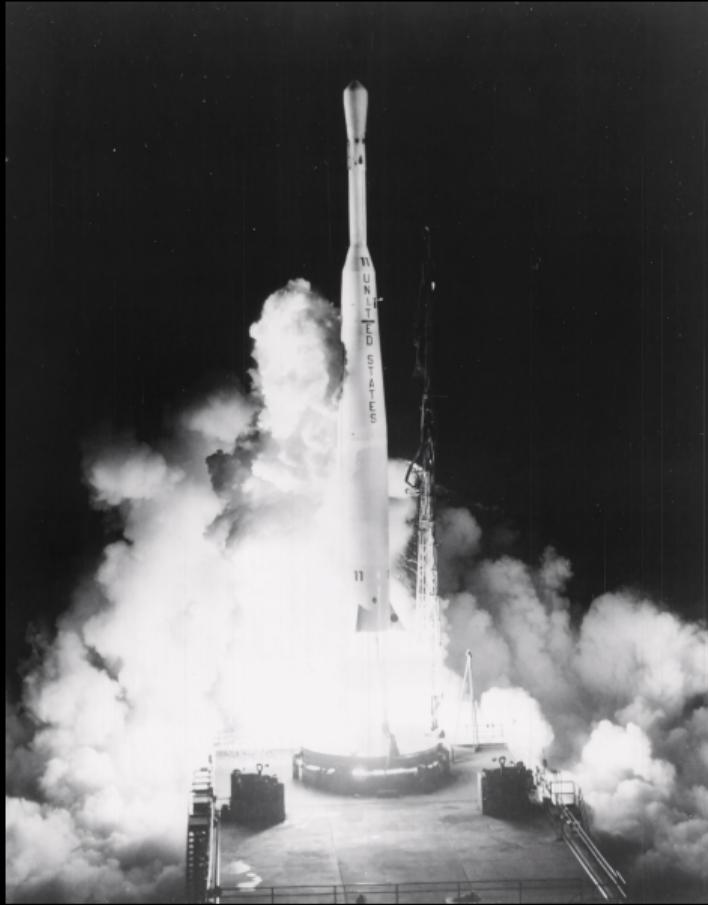


García Alía u. a. – „The HEARTS EU Project and Its Initial Results on Fragmented High-Energy Heavy-Ion Single-Event Effects Testing“

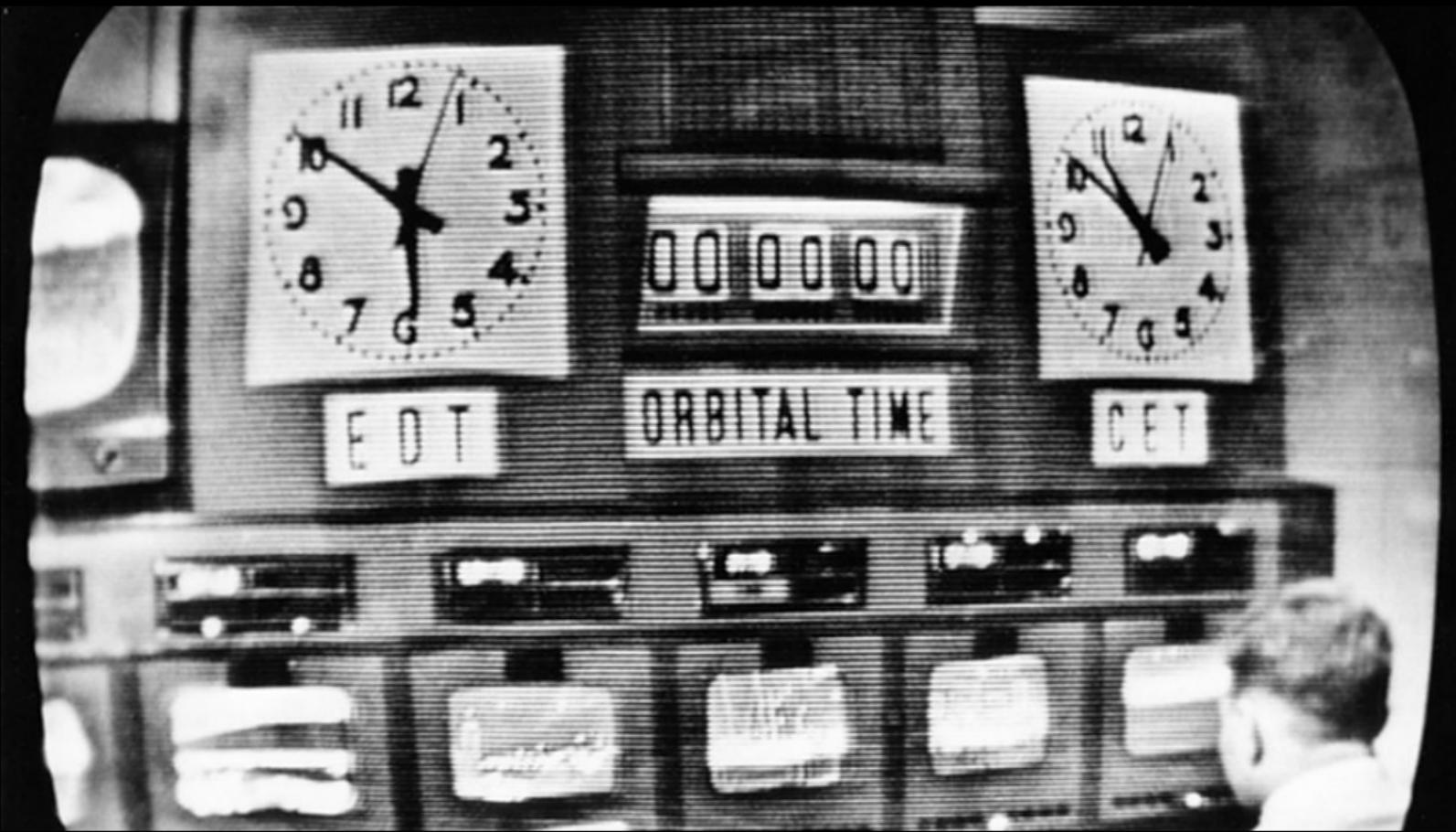




Datei:Delta Rocket Telstar1.jpg – Public domain. Accessed 2025-11-27



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



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

# 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 Nespital**

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

# Gliederung

---

Grundlagen der Strahlungseffekte

Einordnung der Strahlungseffekte

Strahlungsquellen im Weltraum

Van-Allen-Gürtel & SAA als TID-Hotspots

TID-Mechanismus

MOS-Querschnitt & Grundprinzip der Ionisation

Gesamtwirkung im MOSFET

Tests & Qualifikation

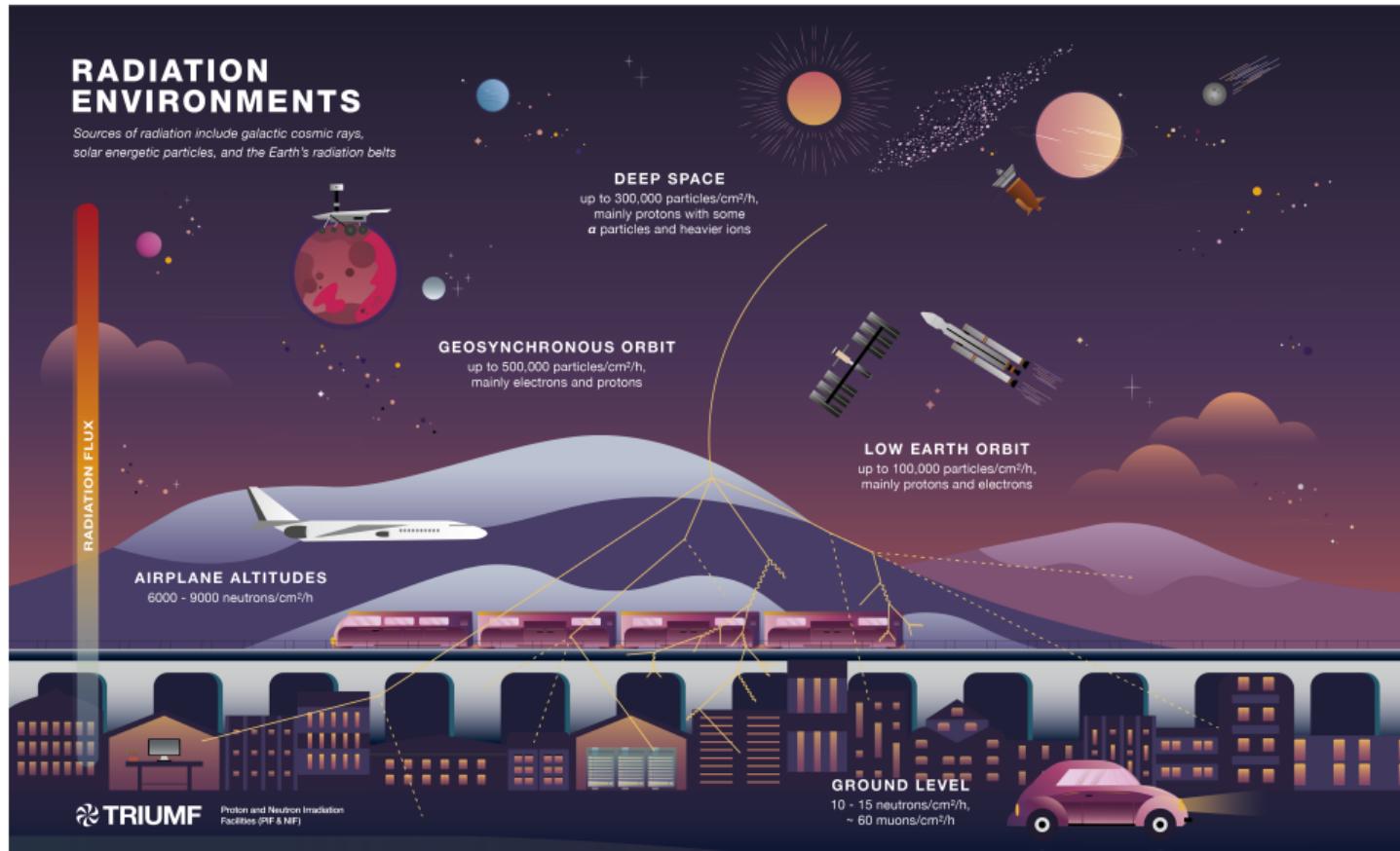
TID-Härtungstests und Qualifikationsverfahren (RHA)

# 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

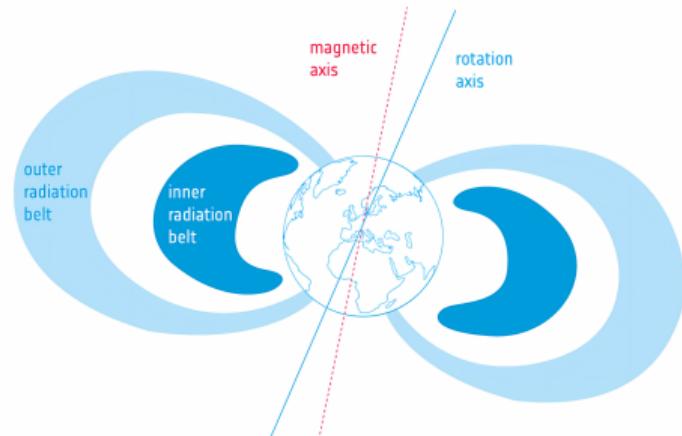
# Strahlendosen im Vergleich



# 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

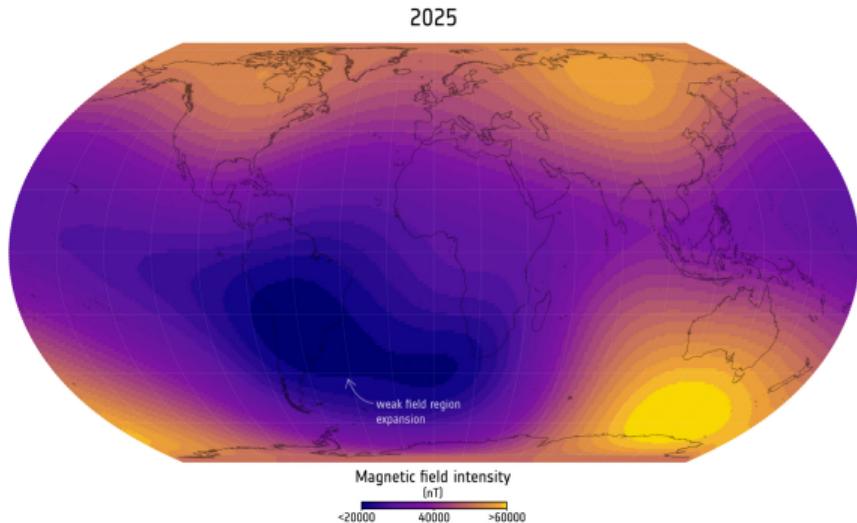


European Space Agency (ESA) 2024

# 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

# MOS-Querschnitt & Grundprinzip der Ionisation

## Ionisation im Oxid:

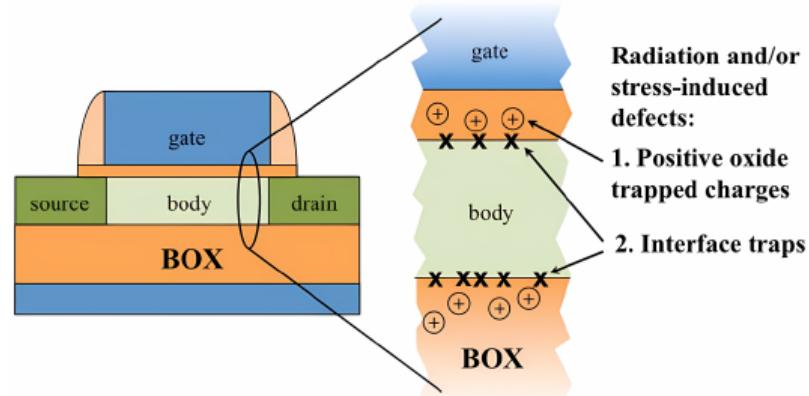
- Strahlung erzeugt Elektron-Loch-Paare in  $\text{SiO}_2$

### 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:  $V_{th} \uparrow$ )

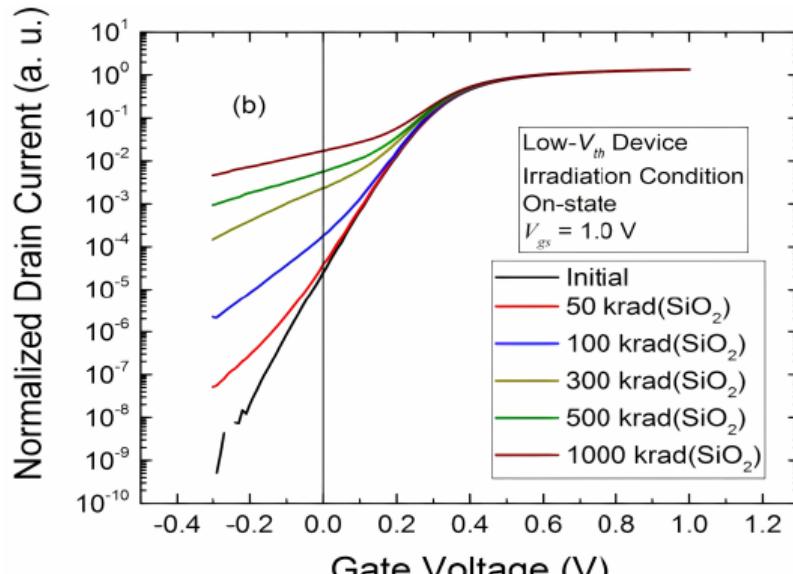
# Gesamtwirkung im MOSFET

## Effekte auf Transistor:

- Positive Oxidladung  $\Rightarrow V_{th}$  sinkt
- Kanal wird früher leitend
- Mehr Leckstrom
- Bei pMOS: Vorzeichen der Effekte oft umgekehrt

## I-V-Kennlinien:

- Schwellenspannung nach links verschoben
- Flacherer Subthreshold-Bereich
- Erhöhter Leckstrom im Sperrbereich



M. P. King u. a. 2017

# Funktionale Konsequenzen in Schaltungen

---

## Auswirkungen auf Schaltungsebene:

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

## Digitale Schaltungen:

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

# 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



calebnstxl 2022

## Zielgrößen:

- $\Delta V_{th}$ , Verstärkung, Leckströme
- Funktionsgrenzen (LOGIC "0/1", analoge Spezifikationen)

## 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)

## 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

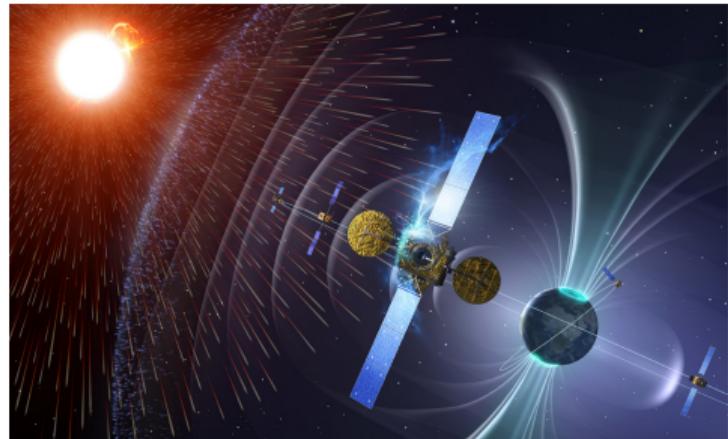
## Hinweis:

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

# Kernaussagen

## Zusammenfassung:

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



HEARTS 2025



Atomic Archive – *Operation Fishbowl | Starfish Prime (1962)*

## 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!

# 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](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/>.

-  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](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/>.