

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

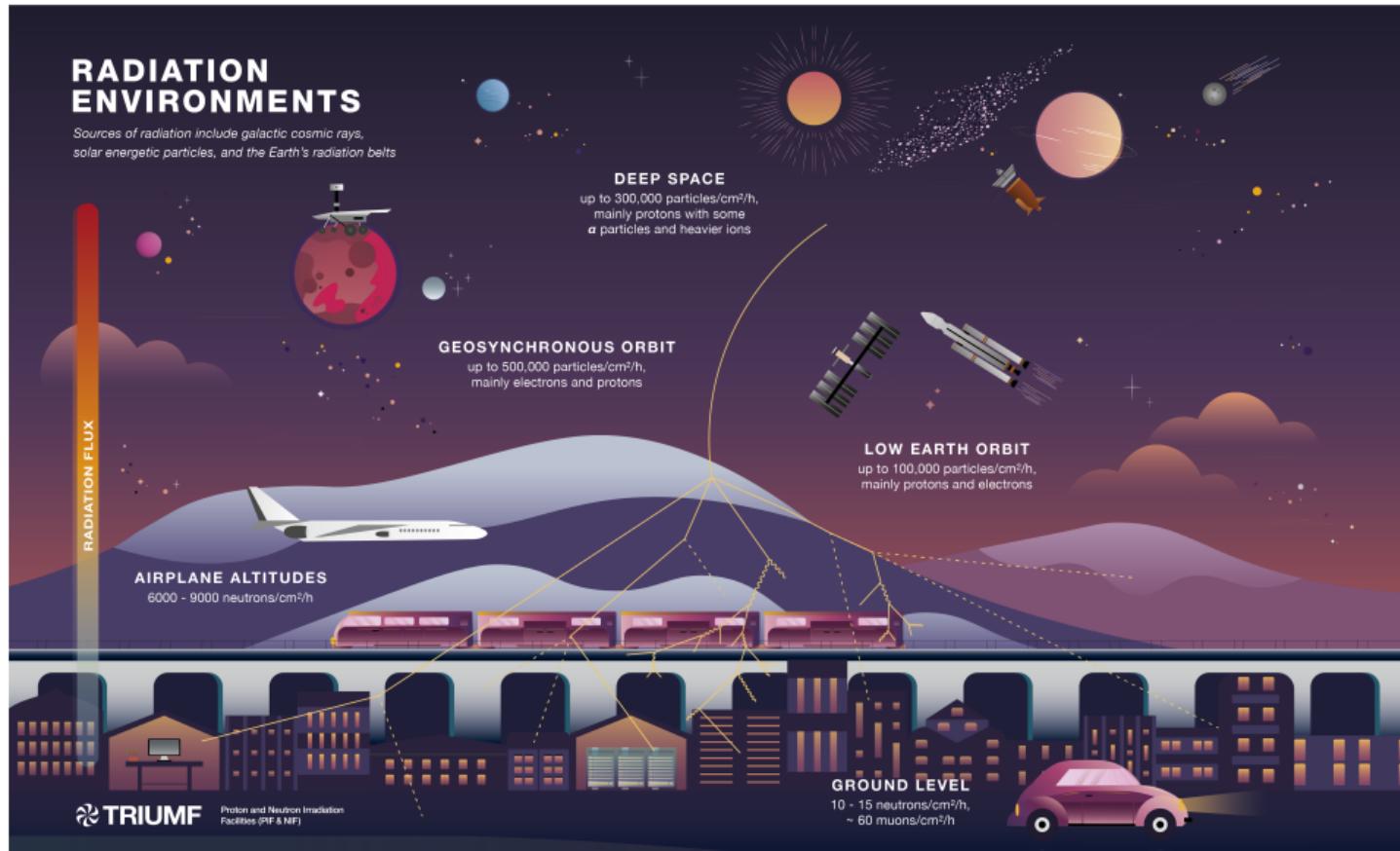
TID-Härtungstests und Qualifikationsverfahren (RHA)

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

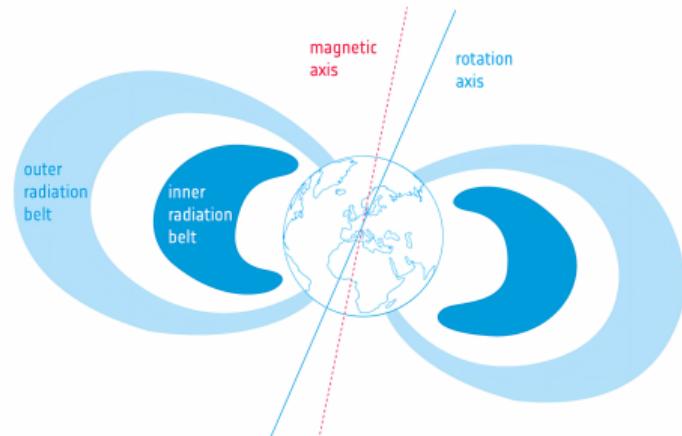
Strahlendosen im Vergleich



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

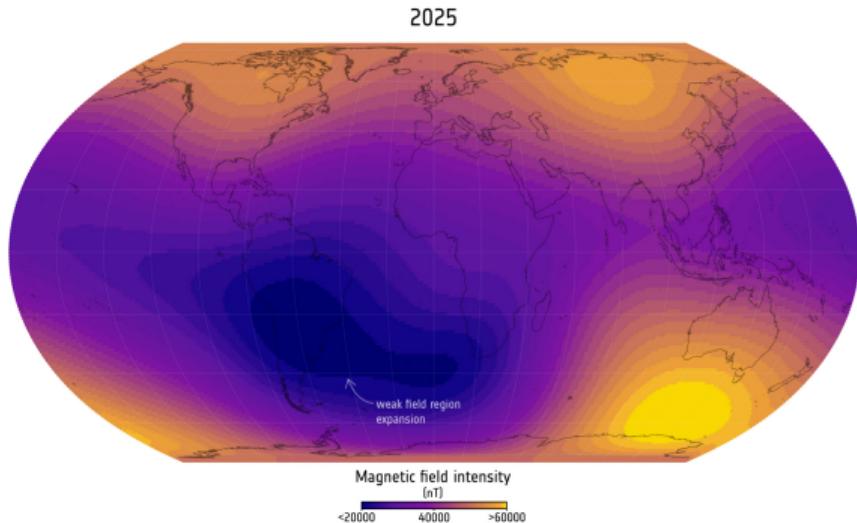


European Space Agency (ESA) 2024

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:

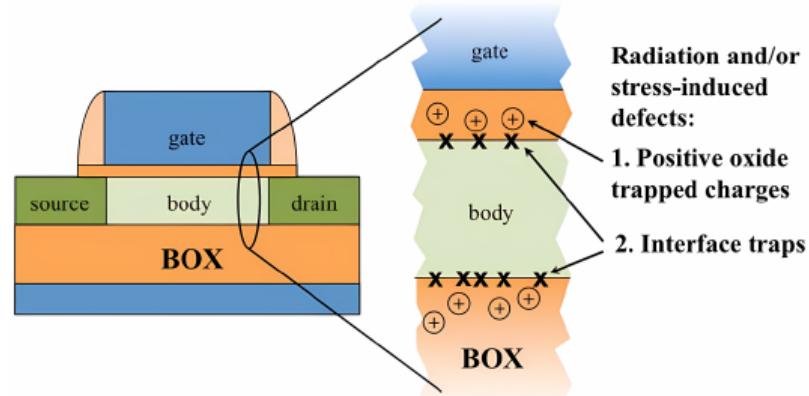
- Strahlung erzeugt Elektron-Loch-Paare in SiO_2

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: $V_{th} \uparrow$)

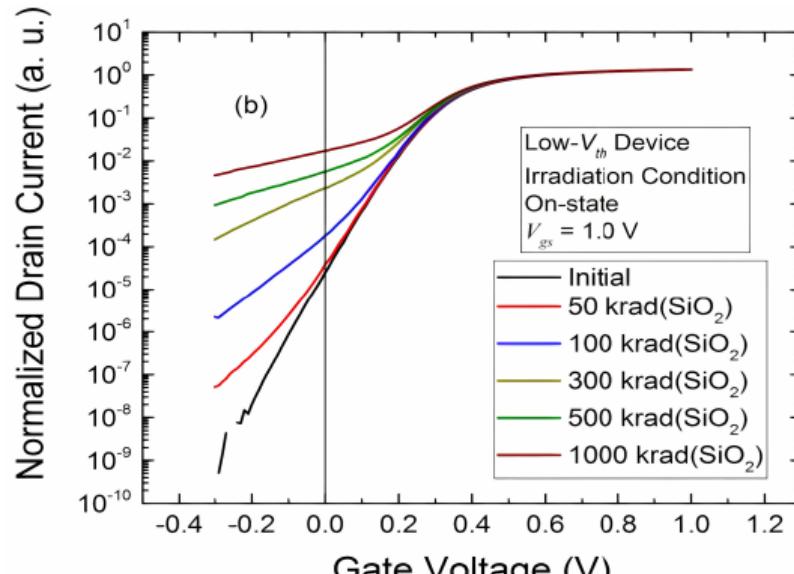
Gesamtwirkung im MOSFET

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

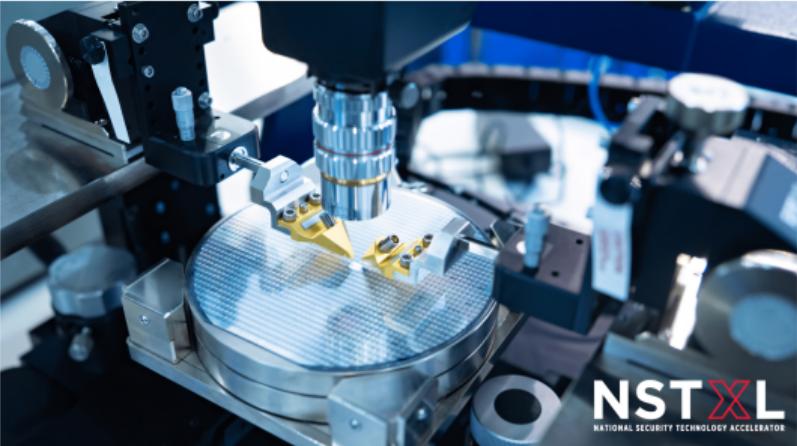
Digitale Schaltungen:

- 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:

- ΔV_{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

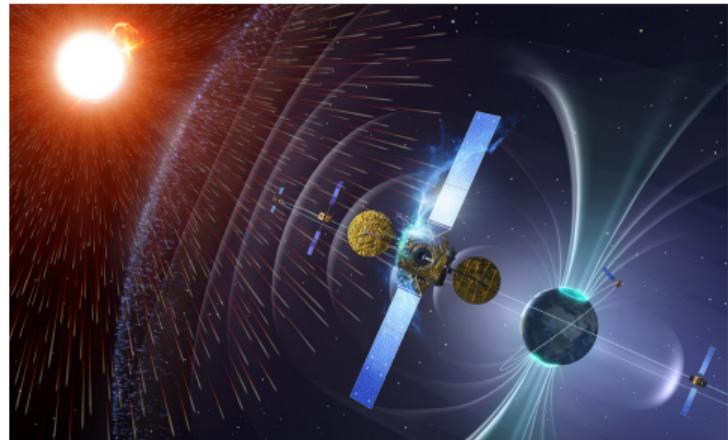
Hinweis:

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

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

Literaturverzeichnis i

-  calebnstxl (März 2022). ***Strengthening Electronic Reliability through Radiation Hardening - NSTXL.*** NSTXL. Accessed 2025-11-28. URL:
<https://nstxl.org/reliability-through-radiation-hardening/>.
-  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/>.

Literaturverzeichnis ii

-  European Space Agency (ESA) (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.
-  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.

Literaturverzeichnis iii

-  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.
-  TRIUMF (2021). **Radiation Environments**. Triumf.ca. Accessed 2025-11-28. URL: <https://radenv.triumf.ca/>.