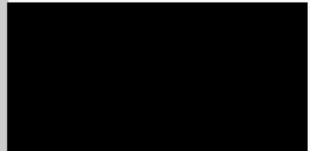


1962: Der erste Kommunikationssatellit startet am 10. Juli von Cape Canaveral aus und ist ein voller Erfolg. Telstar 1 überträgt die ersten Live-Fernsehbilder zwischen den USA und Europa – die Grenzen der Welt schrumpfen. Doch die Euphorie verfliegt schnell. Bereits im Herbst beginnt der 60-Millionen-Dollar-Gigant, 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!



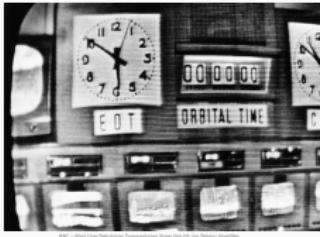
1962: Der erste Kommunikationssatellit startet am 10. Juli von Cape Canaveral aus und ist ein voller Erfolg. Telstar 1 überträgt die ersten Live-Fernsehbilder zwischen den USA und Europa – die Grenzen der Welt schrumpfen. Doch die Euphorie verfliegt schnell. Bereits im Herbst beginnt der 60-Millionen-Dollar-Gigant, 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!



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!



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

└ Grundlagen der Strahlungseffekte

└ Einordnung der Strahlungseffekte

└ Einordnung der Strahlungseffekte

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.

Space Radiation Effects in Electronics

└ Grundlagen der Strahlungseffekte

└ Strahlungsquellen im Weltraum

└ Strahlungsquellen im Weltraum

Strahlungsquellen im Weltraum

Strahlungsquellen:

- Sonne: solare Protonenereignisse, solare Teilchenereignisse
- 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) 2010

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.

Space Radiation Effects in Electronics

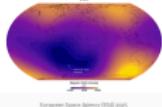
└ Grundlagen der Strahlungseffekte

└ Van-Allen-Gürtel & SAA als TID-Hotspots

└ Van-Allen-Gürtel & SAA als TID-Hotspots

Südatlantische Anomalie (SAA):

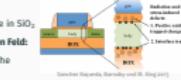
- Lokaler Erdmagnetfeld-Einbruch
- Erhöhte Flüsse von MeV-Protonen und -Elektronen
- Satelliten in LEO: wiederholte Durchflüge \Rightarrow Dosis akkumuliert
- Typisch: TID über Missionsdauer



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.

Ionisation im Oxid:

- Strahlung erzeugt Elektron-Loch-Paare in SiO₂
- drift im elektrischen Feld:
 - Elektronen: hohe Mobilität
⇒ fließen schnell
 - Löcher: sehr geringe Mobilität
⇒ werden eingefangen
- Defektstellen/Traps:
 - intrinsische Oxiddefekte (Oxygen Vacancies, E'-Center)
 - Rangan bevorzugt



Schematische Darstellung von Rangan (Rangan et al., 1997)

⇒ Aufbau einer persistenten positiven Raumladung im Oxid

- Verschiebung der

Threshold-Spannung (NMOS):

 $V_{th,0}$, ..., PMOS: $V_{th,1}$)

Space Radiation Effects in Electronics

TID-Mechanismus

MOS-Querschnitt & Grundprinzip der Ionisation

MOS-Querschnitt & Grundprinzip der Ionisation

2025-11-28

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.

Space Radiation Effects in Electronics

└ TID-Mechanismus

└ Gesamtwirkung im MOSFET

└ Gesamtwirkung im MOSFET

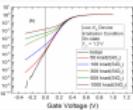
Gesamtwirkung im MOSFET

Effekte auf Transistor:

- Positive Oxidladung $\rightarrow V_{GS}$ 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



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.

Auswirkungen auf Schaltungsebene:

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

Digitale Schaltungen:

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

Space Radiation Effects in Electronics

└ TID-Mechanismus

└ Gesamtwirkung im MOSFET

└ Funktionale Konsequenzen in Schaltungen

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 Ruhestrome 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.

Space Radiation Effects in Electronics

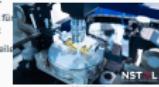
└ Tests & Qualifikation

└ TID-Härtungstests und Qualifikationsverfahren (RHA)

└ TID-Härtungstests und

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_{10} , Verstärkung, Leckströme
- Funktionsgrenzen (LOGIC "0/1", analoge Spezifikationen)

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.

Space Radiation Effects in Electronics

└ Tests & Qualifikation

└ TID-Härtungstests und Qualifikationsverfahren (RHA)

└ TID-Testquellen & Randbedingungen

TID-Testquellen & Randbedingungen

Strahlungsquellen:

- Co-60-Gammastrahler (1,17, 1,33 MeV)
- Elektronen ($E \geq 1 \text{ MeV}$)

Gründe für diese Quellen:

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

Randbedingungen (nach ESCC 22900 u.Ä.):

- Raumtemperatur, Bestrahlung in Luft möglich
- Dosisratebereich z.B. 36 rad/h – 180 krad/h
- Charged-Particle Equilibrium sicherstellen
- Co-60: Abschirmung $< 1,5 \text{ mm Pb} + 0,7 \text{ mm Al}$ (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 niedrerengetischen Anteil des Co-60-Spektrums durch Blei- und Aluminiumabschirmung zu unterdrücken.

Space Radiation Effects in Electronics

└ Tests & Qualifikation

└ TID-Härtungstests und Qualifikationsverfahren (RHA)

└ Dosisrate, ELDRS & Testablauf

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)
- Bestrahlun 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

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.

Space Radiation Effects in Electronics

└ Tests & Qualifikation

└ TID-Härtungstests und Qualifikationsverfahren (RHA) └ Kernaussageen

Kernaussageen

Zusammenfassung:

- TID = kumulative Ionisationschäden 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

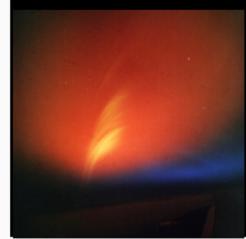


Die Total Ionizing Dose ist kein exotischer Randaspekt, sondern ein zentraler, kumulativer Schädigungsmechanismus in der Raumfahrtelektronik. Sie entsteht durch Ionisation im Gate-Oxid und an der Si-SiO₂-Grenze, führt über Oxid-trapped charge und Interface States zu Schwellenspannungsverschiebungen,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

Space Radiation Effects in Electronics

└ Tests & Qualifikation

└ TID-Härtungstests und Qualifikationsverfahren (RHA)



...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.

Space Radiation Effects in Electronics

2025-11-28

└ Tests & Qualifikation

└ TID-Härtungstests und Qualifikationsverfahren (RHA)

└ 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.

Temporary page!

\LaTeX was unable to guess the total number of pages correctly.
As there was some unprocessed data that should have been added to the final page this extra page has been added to receive it.

If you rerun the document (without altering it) this surplus page will go away, because \LaTeX now knows how many pages to expect for this document.