

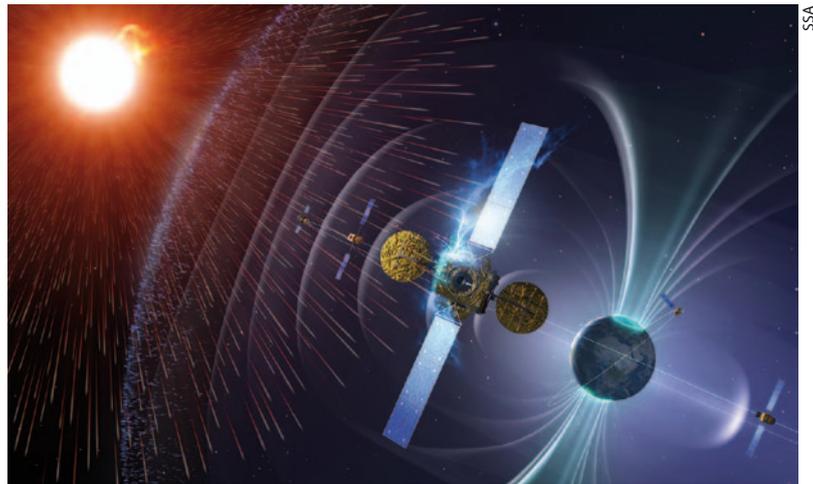
## Nur die härtesten Schaltkreise dürfen ins All

Damit Satelliten störungsfrei arbeiten, muss ihre Elektronik den harschen Weltraumbedingungen widerstehen können. Möglich machen das gehärtete Schaltkreise.

Die Live-Schaltung im Fernsehen, die Wettervorhersage, die Fahrt per Navi oder das Bezahlen am Kartenterminal einer Tankstelle irgendwo in der Pampa – all das ermöglichen Satelliten, welche die Daten liefern oder übertragen. Vor einigen Jahren hat die Technologieberatungsfirma „The Tauri Group“ abgeschätzt, dass mit privatwirtschaftlichen satellitengestützten Diensten und begleitenden Dienstleistungen weltweit jährlich 100 Milliarden US-Dollar umgesetzt werden. Aber Satelliten sind komplexe Systeme, deren Elektronik im Weltall energiereicher Strahlung ausgesetzt ist. Damit sie nicht ständig gestört wird oder gar vorzeitig ausfällt, muss sie „strahlungsgehärtet“ sein.

Die Satelliten müssen einiges aushalten, denn sie sind Röntgen- und Gammastrahlung ausgesetzt und werden von Elektronen, Protonen, Alphateilchen bis hin zu schweren Atomkernen bombardiert. Die energiereichen Teilchen und elektromagnetischen Strahlen stammen von unserer Sonne, der Milchstraße und dem extragalaktischen Raum.

Das Magnetfeld der Erde und ihre Atmosphäre schützen das Leben auf der Oberfläche vor diesem unaufhörlichen Bombardement. Satelliten profitieren nicht mehr von der Atmosphäre, aber je nach Bahnhöhe eventuell vom Erdma-



Energereiche Partikel oder Photonen können zu Störungen auf Satelliten führen. Besonders problematisch sind schwe-

re Atomkerne. Nur mit strahlungsgehärteter Elektronik können die Satelliten ihre nominalen Betriebsdauern erreichen.

gnetfeld. Unterhalb des Van-Allen-Strahlungsgürtels, also bei Erdumlaufbahnen, die nur einige hundert Kilometer hoch sind, kommen vergleichsweise wenig Partikel an, weil sich die elektrisch geladenen entlang der Magnetfeldlinien abströmen. Dagegen gibt es Bereiche innerhalb des Strahlungsgürtels, in denen sich besonders viele Teilchen aufhalten: in Höhen zwischen 3000 und 6000 Kilometern sind es vor allem Protonen, in Höhen um 25 000 Kilometer vor allem Elektronen. Dort ist die Strahlenbelastung also besonders hoch – oft sogar höher als im geostationären Orbit in knapp 36 000 Kilometer Höhe, wo viele Kommunikations- und Nachrichtensatelliten postiert sind. Die korrekte Auslegung der Strahlungshärtung für einen Satelliten richtet sich daher nach der konkreten Mission. Tendenziell ist ungeschützte Digitalelektronik anfälliger für Störungen, weil für gewöhnlich die Betriebsspannungen und Strukturen kleiner sind als bei Analogelektronik.

Trifft ein energiereiches Teilchen auf ein elektronisches Bauteil, können Störungen im Gitter und Ionisation auftreten (Abb. 1). Gitterstörungen entstehen durch Protonen, durch schwerere geladene Kerne oder durch energiereiche

Gammaquanten. Sie verändern die Anordnung einzelner Gitteratome durch den Energie- und Impulseintrag dauerhaft, sodass es mehr Rekombinationszentren gibt, was sich wiederum negativ auf den Halbleiterübergang und damit auf die Funktion des Bauteils auswirkt. Elektrisch geladene Teilchen, die nicht genügend Energie tragen, um das Kristallgitter dauerhaft zu beeinträchtigen, können zumindest vorübergehend Störungen auslösen, weil zum Beispiel die Stromstärke eines elektronischen Bauteils durch das Ereignis deutlich außerhalb der Spezifikationen zu liegen kommt. Im günstigsten Fall kehrt das betroffene Bauteil nach einem Reset wieder in seinen regulären Betriebszustand zurück, im ungünstigsten Fall kommt es zu dauerhaften Schäden. Gerade massereiche Atomkerne können sich wegen ihrer hohen kinetischen Energie verheerend auswirken. Treffen sie auf einen Transistor, hinterlassen sie entlang ihrer Bahn eine Ionisationsspur. Da die Strukturen eines Transistors sehr klein sind und die Höhe der Nennspannungen bei modernen Bauteilen immer weiter sinkt, können solche Ereignisse zum „thermischen Kurzschluss“ führen, weil sich die lokal auftretende Wärme nicht schnell

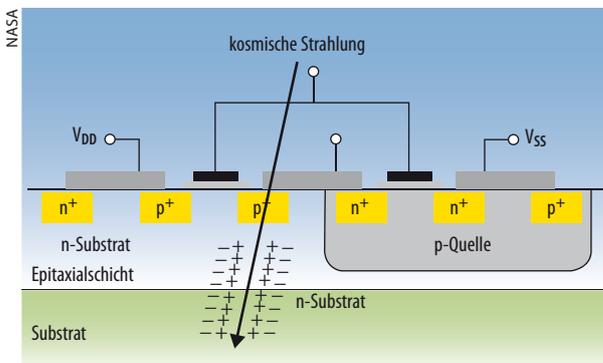


Abb. 1 Trifft ein einzelnes energiereiches Teilchen der kosmischen Strahlung auf einen Transistor, hinterlässt es entlang seiner Bahn eine Ionisationsspur, welche die Elektronik schädigen kann.

genug abführen lässt. Entscheidend für das Funktionieren eines elektronischen Bauteils sind also die Strahlungsmenge, die es im Lauf der Zeit absorbiert, und seine „Widerstandsfähigkeit“ im Betrieb gegenüber singulären Störungen.

Die Energiedosis charakterisiert die Stärke ionisierender Strahlung. In der Raumfahrt gibt man diese nicht in der SI-Einheit Gray (Gy), sondern in der alten Einheit Rad (rd) an. Dabei gilt die Umrechnung  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rd}$ . Zusätzlich wird die Energiedosis auf ein bestimmtes Material angegeben. Die Angabe rad(Si) gilt für Silizium.

Schaltkreise gelten als strahlungsgehärtet, wenn sie mindestens eine Gesamtionisationsdosis von 100 Kilorad(Si) und Einzelereignisse mit Teilchenenergien bis zu 120 MeV unbeschadet überstehen. Mancher Anbieter verwendet die Bezeichnung „strahlungsgehärtet“ erst ab 300 krad(Si). Schaltkreise aus der Massenfertigung erreichen dagegen nur Werte zwischen 3 krad(Si) und 30 krad(Si).

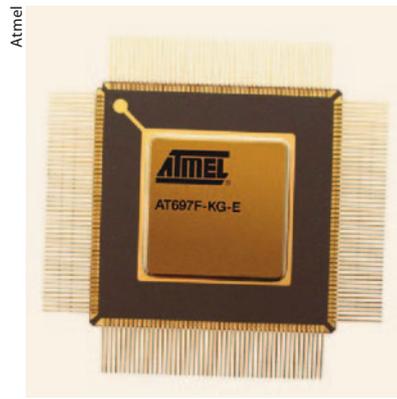
### Abschirmen? Logisch!

Strahlungsharte Elektronik lässt sich auf verschiedene Weise erzeugen (Abb. 2). Die Abschirmung der Bauelemente ist natürlich der naheliegende Ansatz. Abschirmungen gibt es sowohl auf Chip- und Package-Ebene als auch auf Systemebene. Auf Chipebene handelt es sich um nur mikrometerdicke Passivierungsschichten, während bei Gehäusen zum Beispiel Abschirmungen mit Dicken im Millimeterbereich typisch sind. Selbst

die Wahl des Substrats, auf dem ein Chip gefertigt wird, beeinflusst die Strahlungshärte des Bauteils. So sind Schaltkreise auf Substraten mit elektrisch isolierenden Schichten weniger anfällig.

Auch die inhärenten Eigenschaften bestimmter Bauteile kann man sich zu Nutze machen. So wurden zum Beispiel früher Speicherbausteine auf Basis der SRAM-Technologie den billigeren DRAMs vorgezogen, die seit Jahren im Arbeitsspeicher irdischer PCs zu finden sind. Denn SRAMs besitzen größere Speicherzellen, was es unwahrscheinlicher macht, dass ein Einzelereignis gleich mehrere Zellen in Mitleidenschaft zieht. Durch die heute verfügbaren Abschirmungen auf Chip- und Package-Ebene lassen sich jedoch auch DRAMs inzwischen vergleichbar strahlungshart machen.

Daneben gewinnen Fehlertoleranz und Redundanz auf Chip-, Bauteil- oder Systemebene zunehmend an Bedeutung bei strahlungsharter Satellitenelektronik. Diese logischen Korrekturen beruhen auf einem Vergleich mehrerer Rechenergebnisse, die parallel in verschiedenen Chips oder in dessen Bereichen abgelaufen sind. Stimmen die Werte überein, ist alles in Ordnung, weicht ein Wert ab, wird er nach einer Plausibilitätsbetrachtung automatisch verworfen. Solche Ansätze können so weit gehen, dass dedizierte Schaltungen die Betriebszustände identischer, parallel laufender Einheiten kontrollieren und bei Abweichungen in den Ergebnissen automatisch einen Hard-



ware-Reset des Systems ausführen.

Die logische Fehlertoleranz erlaubt es auch, für bestimmte Satellitenmissionen günstigere Bauteile zu verwenden – qualifizierte, statt strahlungsgehärtete Bausteine. Solche Bauteile werden gemeinsam mit der Massenware gefertigt, zeichnen sich aber durch enger definierte Kenngrößen und eine nachträgliche messtechnische Charakterisierung aus. Qualifizierte Bausteine kosten nur noch etwa ein Zehntel des vergleichbaren strahlungsgehärteten Bausteins.

Doch nicht nur die Kosten sind ein Argument für qualifizierte Elektronik. Strahlungsgehärtete Bausteine sind Nischenprodukte und hinken daher den heutigen technischen Möglichkeiten deutlich hinterher. Ist zum Beispiel auf dem Satelliten eine hohe Rechenleistung erforderlich, kommen die Entwickler womöglich gar nicht umhin, für den Bordrechner qualifizierte statt strahlungsgehärtete Elektronik zu verwenden.<sup>#)</sup>

Michael Vogel

#) Ich danke den Wissenschaftlern vom Institut für Optische Sensorensysteme des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums (DLR), Berlin, für hilfreiche Erläuterungen.