Verlässliche Systemsoftware

Einleitung

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Informatik 12 – Arbeitsgruppe Systemsoftware

Technische Universität Dortmund

`https://sys.cs.tu-dortmund.de`

KW41 2021

Softwarefehler und ihre Konsequenzen

- Echtzeitsysteme sind häufig in unser **tägliches Leben eingebettet**
  - Interagieren vielfältig und häufig mit anderen Systemen und Menschen
  - Fehlfunktionen können katastrophale Folgen haben
    - Gefahr für Leib und Leben, finanzieller Schaden, ...
  - Einsatz erfordert großes Vertrauen in die verwendete Technik
  - Beispiele: Automobile, Industrieanlagen, Medizingeräte, Luftfahrt

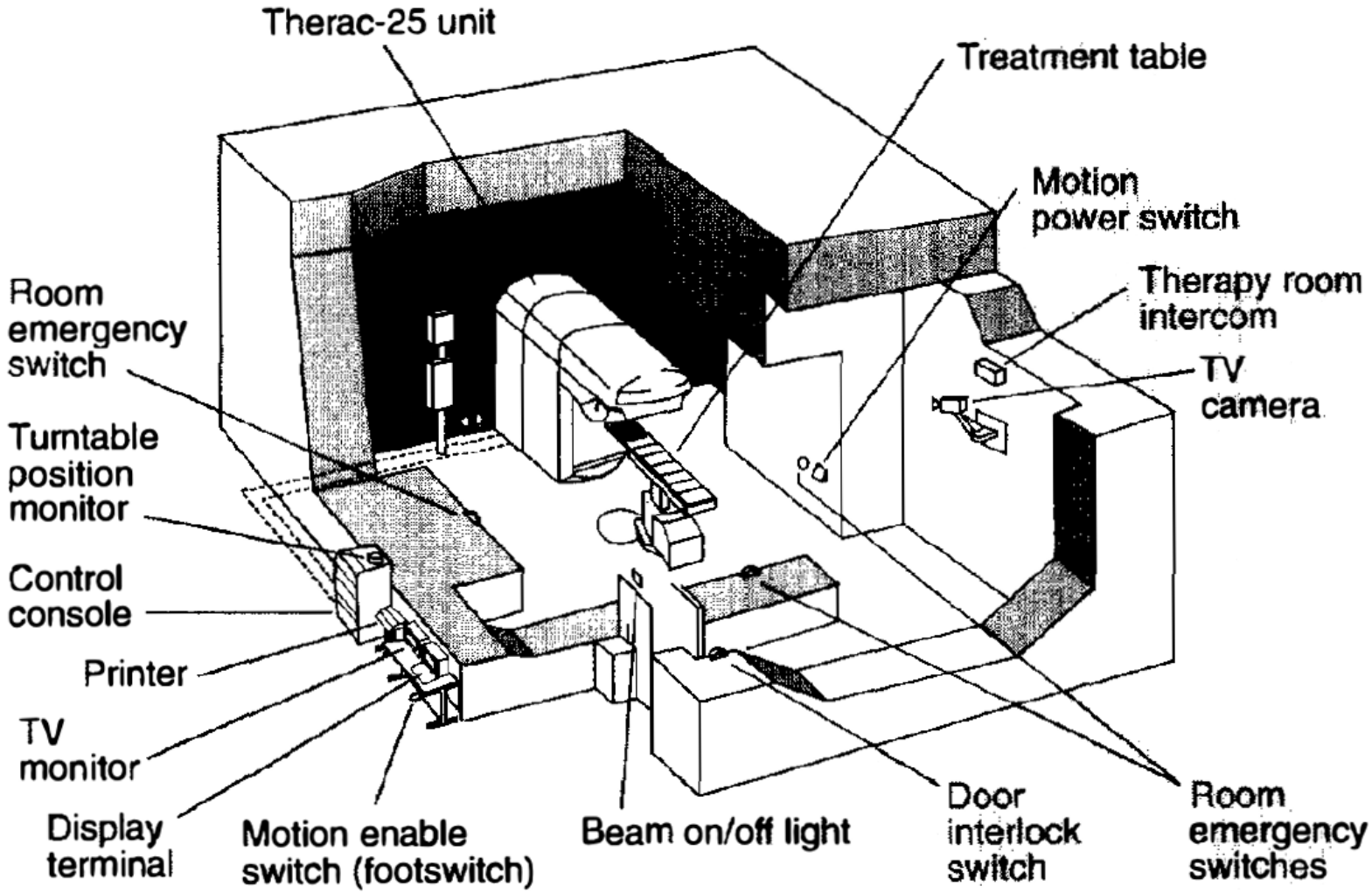
☞ Sicherheitskritische Systeme (engl. *safety-critical systems*)
  - Mit hohen Anforderungen an die funktionale Sicherheit (engl. *functional safety*)

- Korrekte Funktion zu garantieren ist eine große Herausforderung
  - Und gelingt leider nicht immer ...

  - Linearbeschleuniger Therac-25 ↦ II/3 ff.
  - Trägerrakete Ariane 5 ↦ II/16 ff.
  - Mars Climate Orbiter ↦ II/22 ff.

AECL Therac-25

Linearbeschleuniger für den Einsatz in der Strahlentherapie



(Quelle: Nancy Leveson [4])

Entstehungsgeschichte

frühe 70er

Therac-6 6 MeV, Röntgenstrahlung

Therac-20 20 MeV, Röntgenstrahlung und Elektronenstrahlen

- Sicherungssysteme waren allesamt mechanisch/elektrisch

Mitte der 70er AECL begann die Entwicklung des Therac-25

- Neuartiger Doppelweg-Linearbeschleuniger (kleiner, billiger)
- Betriebsmodi: Röntgenstrahlung (25 MeV), Elektronenstrahlen
- Kontrollrechner (DEC PDP11) und Bedienterminal (VT100)
- Sicherungssysteme durch Software ersetzt

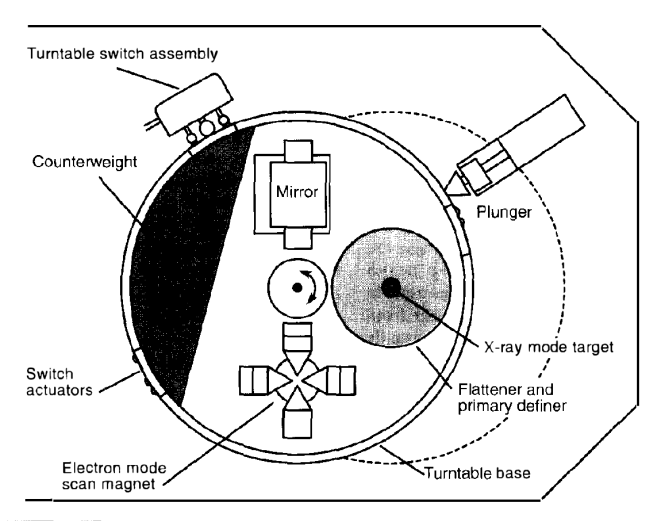
1976 Erster Prototyp ohne Steuerung durch den Kontrollrechner

1982 - 1985 Fertigung und Auslieferung

- Installationen in elf amerikanischen und kanadischen Kliniken

Handhabung/Funktionsweise

- Gerät unterstützte verschiedene Modi
  - Ausrichtung des Strahlengangs
    - Mithilfe eines Lichtkegels/Spiegels
  - Elektronenstrahlen variablen Energieniveaus
    - Justierung durch Ablenkmagnete
  - Röntgenstrahlen (25 MeV)
    - Erzeugt durch ein Wolfram-Target
    - Mit einem Kollimator gebündelt/ausgerichtet



(Quelle: Nancy Leveson [4])

Behandlungsablauf

Der Operateur . . .

1. Im Behandlungsraum
   - Patienten $\rightsquigarrow$ Behandlungstisch
   - Stellt Strahlengang etc. ein
2. Verlässt den Behandlungsraum
3. am Bedienterminal
   - Eingabe der Behandlungsparameter
   - Behandlungsart, Energieniveau, . . .
4. Steuerrechner überprüft Eingabe
   - Freigabe im Erfolgsfall

Betriebssoftware/Firmware

- Basierend auf der Therac-6-Firmware (Entwicklungsbeginn 1972)
  - Ein Entwickler, PDP11-Assembler, Portierung ab 1976
- In Software implementierte Aufgaben

  Systemüberwachung Behandlung verhindern/pausieren/abbrechen

  Parameterprüfung Für manuelle Eingaben des Operateurs

  Initialisierung Für die Behandlung (Magnete aktivieren . . .)

  Elektronenstrahl Kontrollieren: deaktivieren/aktivieren
- Proprietäres Echtzeitbetriebssystem (in Assembler implementiert)
  - Vorranggesteuerte, verdrängende Ablaufplanung
- Programmartefakte der Anwendung
  - Daten – zur Kalibrierung und über den Patienten
  - Unterbrechungsbehandlungen – Zeitgeber, „Power up“, Konsole . . .
  - Zeitkritische Aufgaben – Treatment Monitor, Servo, Housekeeper
  - Nicht-zeitkritische Aufgaben – Checksummenberechnung, Verarbeitung der Konsole (Tastatur, Bildschirm), Kalibrierung, Snapshot, . . .

Reihe schwerer Zwischenfälle

- Kennestone Regional Oncology Center – 3. Juni 1985
  - Geplant: 10 MeV Elektronenstrahl, Patientin beklagt Schmerzen, nie aufgeklärt
- Ontario Cancer Foundation – 26. Juli 1985
  - Geplant: Elektronenstrahl $\rightsquigarrow$ HTILT (NO DOSE) (Operateur wiederholt 4x)
  - Patient erhält Überdosis ($\geq$13 000 Rad), verstirbt jedoch krankheitsbedingt
  - AECL gibt fehlerhaftem Taster Schuld
- East Texas Cancer Center – 21. März 1986
  - Geplant: 22 MeV Elektronenstrahl (180 Rad) $\rightsquigarrow$ Malfunction 54 (wiederholt)
  - Patient beschreibt „elektrischer Schlag“ und seine Hand „verließe den Körper“
  - Patient verstirbt 5 Monate später an Überdosis (16 500 – 25 000 Rad)
- East Texas Cancer Center – 11. April 1986
  - Geplant: 10 MeV Elektronenstrahl $\rightsquigarrow$ Malfunction 54
  - Patient beschreibt „Feuer“, „Lichtblitze“, „Geruch von verbranntem“
  - Patient verstirbt 2 Wochen später an Überdosis ($\sim$25 000 Rad)
- Yakima Valley Memorial Hospital – 17. Januar 1987
  - Geplant: Filmüberprüfung und anschließend Photonenbestrahlung (78 Rad)
  - Patient beschreibt „brennen“ im Brustbereich, sichtbare Verbrennungen
  - Patient verstirbt 3 Monate später an Überdosis (8 000 – 10 000 Rad)

Softwarefehler 1: Was war passiert?

```
PATIENT NAME    : JOHN DOE
TREATMENT MODE : FIX      BEAM TYPE: X      ENERGY (MeV): 25

                              ACTUAL      PRESCRIBED
     UNIT RATE/MINUTE           0            200
     MONITOR UNITS            50  50         200
     TIME (MIN)               0.27           1.00

GANTRY ROTATION (DEG)          0.0            0      VERIFIED
COLLIMATOR ROTATION (DEG)    359.2          359      VERIFIED
COLLIMATOR X (CM)             14.2           14.3    VERIFIED
COLLIMATOR Y (CM)             27.2           27.3    VERIFIED
WEDGE NUMBER                   1              1      VERIFIED
ACCESSORY NUMBER               0              0      VERIFIED

DATE    : 84-OCT-26   SYSTEM : BEAM READY   OP.MODE: TREAT AUTO
TIME    : 12:55. 8    TREAT  : TREAT PAUSE           X-RAY 173777
OPR ID  : T25VO2-RO3  REASON : OPERATOR     COMMAND:
```

(Quelle: Nancy Leveson [4])

- Bedienung nach einigen Monaten Eingewöhnung . . .
  - Operateur verlässt den Raum, gibt Behandlungsparameter ein
    - Eingabefehler: x anstelle von e (Röntgen- statt Elektronenstrahl)
    - Schnelle Korrektur des Fehlers mit der Cursor-Taste
  - Behandlung wurde mit der Meldung „Malfunction 54“ pausiert
    - Bedeutung: „dose input 2“ - die Strahlendosis ist zu hoch/niedrig
    - Behandlung wurde gewohnheitsmäßig mit p fortgesetzt

Softwarefehler 1: Kritischer Wettlauf (1)

Rekonstruktion [4] basiert auf Information von AECL, ist aber nicht umfassend

- Aufgabe „Treatment Monitor“ (`Treat`) kontrolliert Behandlungsablauf
  - Besteht aus acht Subroutinen
  - Steuerung durch die Variable `Tphase`
  - Plant sich am Ende erneut ein
- Subroutine `DataEnt` kommuniziert mit der Tastaturbehandlung
  - Nebenläufig zu `Treat` $\rightsquigarrow$ geteilte Variable `DataEntComplete`
    - `DataEntComplete == 1` $\rightsquigarrow$ `Tphase = 3`: Dateneingabe abgeschlossen
    - Sonst: `Tphase` bleibt unverändert, `DataEnt` wird erneut ausgeführt
  - `DataEntComplete == 1` garantiert, dass Endposition erreicht wurde
    - Nicht, dass der Cursor noch dort ist $\rightsquigarrow$ spätere Eingaben gehen u. U. verloren
    - Dateneingabe wird u. U. beendet, bevor alle Änderungen eingegeben wurden
- Tastaturbehandlung sichert Modus $\mapsto$ Variable `meos`
  - Byte 0 $\mapsto$ Position der Drehscheibe je nach Betriebsmodus
  - Byte 1 $\mapsto$ weitere Betriebsparameter (Konsistenz zu Byte 0 ist wichtig!)

```
void Task_Treat() {
  switch(TPhase) {
  case 0: Reset(); break;
  case 1: DataEnt(); break;
  ...
  case 3: SetUp_Test(); break;
  ...
  default: ...
  }
  reschedule_task(Task_Treat);
}
```

Softwarefehler 1: Kritischer Wettlauf (2)

```
void DataEnt() {
  if(specified(meos)) {
    init_params(meos);
    Magnet();
    if(changed(meos))
      return;
  }
  if(DataEntComplete)
    Tphase = 3;
  if(!DataEntComplete) {
    if(reset())
      Tphase = 0;
}}
```

```
void Magnet() {
  setMagnetFlag();
  while(moreMagnets()) {
    setNextMagnet();
    Ptime();
    if(changed(meos))
      return;
}}
```

```
void Ptime() {
  while(delay()) {
    if(magnetFlag()) {
      if(editing() &&
         changed(meos) )
        return;
  }}
  resetMagnetFlag();
}
```

- Routine `DataEnt`
  - Setzt Betriebsparameter ($\rightsquigarrow$ siehe `meos`)
  - Initialisiert die Ablenkmagnete ($\rightsquigarrow$ `Magnet`)
  - Aktualisiert ggf. `Tphase`
- Routine `Magnet`
  - Initialisiert Magnet für Magnet
    - Angezeigt durch das Flag `MagnetFlag`
  - Wartet mit `Ptime` eine Zeitspanne ab
    - Ca. 1 Sekunde je Ablenkmagnet

  $\rightsquigarrow$ Insgesamt ca. 8 Sekunden für 8 Magnete
- Routine `Ptime`
  - Wartet die Verzögerung aktiv ab
  - Setzt `MagnetFlag` zurück
    - Eingaben werden nur beim 1. Aufruf erkannt
    - Die weiteren Aufrufe führen diese Überprüfung nicht durch

Softwarefehler 1: Auslösung & Behebung

Auslösung: Fehleingabe durch Operateur (falscher Modus)

- ⇝ Korrektur innerhalb von 8 Sekunden
- ⇝ Änderung blieb unbemerkt (`Ptime` hatte das Flag zurückgesetzt)
- ⇝ `DataEnt` beendet die Dateneingabe
- ⇝ Aufgabe „Hand“ übernimmt neuen Wert aus `meos`
  - Der Drehteller aktiviert den Elektronenstrahlmodus
  - übrige Betriebsparameter sind für Röntgenstrahlung eingestellt

Fehlerbehebung: (siehe Folie II/9 und Folie II/10)

- Zusätzliches Flag `cursorOnCommandLine`
  - Eingabe dauert an, falls Cursor nicht auf der Kommandozeile
- `MagnetFlag` wird am Ende von `Magnet` zurückgesetzt
  - Nicht mehr durch `Ptime` wie ursprünglich implementiert
  - Etwaige Änderungen werden nun nicht mehr „übersehen“

Softwarefehler 2: Ein fataler Ganzzahlüberlauf

```
void Setup_Test() {
  if(test()) {
    Class3++;
  }

  if(F$mal == 0)
    Tphase = 2;

  return;
}
```

```
void Lmtchk() {
  if(Class3 != 0) {
    Chkcol();
  }
}
```

```
void Chkcol() {
  if(col != treat)
    F$mal |= 0x100;
}
```

- Variable `Class3` wird gesetzt, wenn der „Lichtkegel/Spiegel“(-Testmodus) aktiviert wird
- Routine `Setup_Test`
  - Inkrementiert `Class3` im Testmodus
  - Fragt `F$mal` ab, um den Kollimator zu prüfen
- Routine `Lmtchk`
  - Ruft `Chkcol` auf, falls `Class3` gesetzt ist
- Routine `Chkcol` prüft die Kollimatorposition
  - Setzt ggf. Bit 9 der Variable `F$mal`

Problem: `Class3` ist eine 1 Byte große Ganzzahlvariable

- `Setup_Test` wird wiederholt und häufig aufgerufen
  - → Beim 256. Aufruf läuft `Class3` über
  - → Die Kollimatorposition wird nicht überprüft
  - → Routine `Setup_Test` wird beendet, der Elektronenstrahl aktiviert

Softwarefehler 2: Auslösung und Behebung

Auslösung: Wechsel des Betriebsmodus

- Operateur kontrolliert die Position des Patienten
  - Hierfür wird der Modus „Lichtkegel/Spiegel“ aktiviert
- Anschließend: Set-Knopf oder Set-Kommando
  - Exakt wenn `Class3` überläuft
- Fehlstellung des Kollimators wird nicht überprüft/erkannt
  - Variable `F$mal` hatte den Wert 0 (`Chkcol` wurde nicht augerufen)

  → Der Elektronenstrahl wurde mit 25 MeV aktiviert

Fehlerbehebung: die Variable `Class3` wird nicht inkrementiert

- Stattdessen wird `Class3` auf einen Wert > 0 gesetzt

Therac-25: Resümee

- Musterbeispiel für schlechte Softwareentwicklung
  - **Mangelhafte Qualität** des Softwareprodukts
    - Produkt wurde schlampig entworfen und implementiert
    - Entwicklungsdokumentation war praktisch nicht vorhanden
    - Kryptische Fehlermeldungen, die häufig auftraten
    - ...
  - **Mangelhafte Organisation** der Softwareentwicklung
    - Ein einziger Entwickler für Entwurf, Implementierung und Test
    - Praktisch keine Qualitätssicherungsmaßnahmen
    - Kein systematisches Vorgehen beim Testen (nur Systemtest)
    - ...
- Negativbeispiel für den Umgang mit den Geschehnissen
  - Nutzer wurden nicht umfassend über Vorkommnisse informiert
    - Die Operateure glaubten, eine Überdosis könne nicht auftreten
  - Fehler wurden nicht rigoros untersucht und beseitigt
    - Was sicherlich mit der mangelhaften Qualität der Software zu tun hat
  - ...

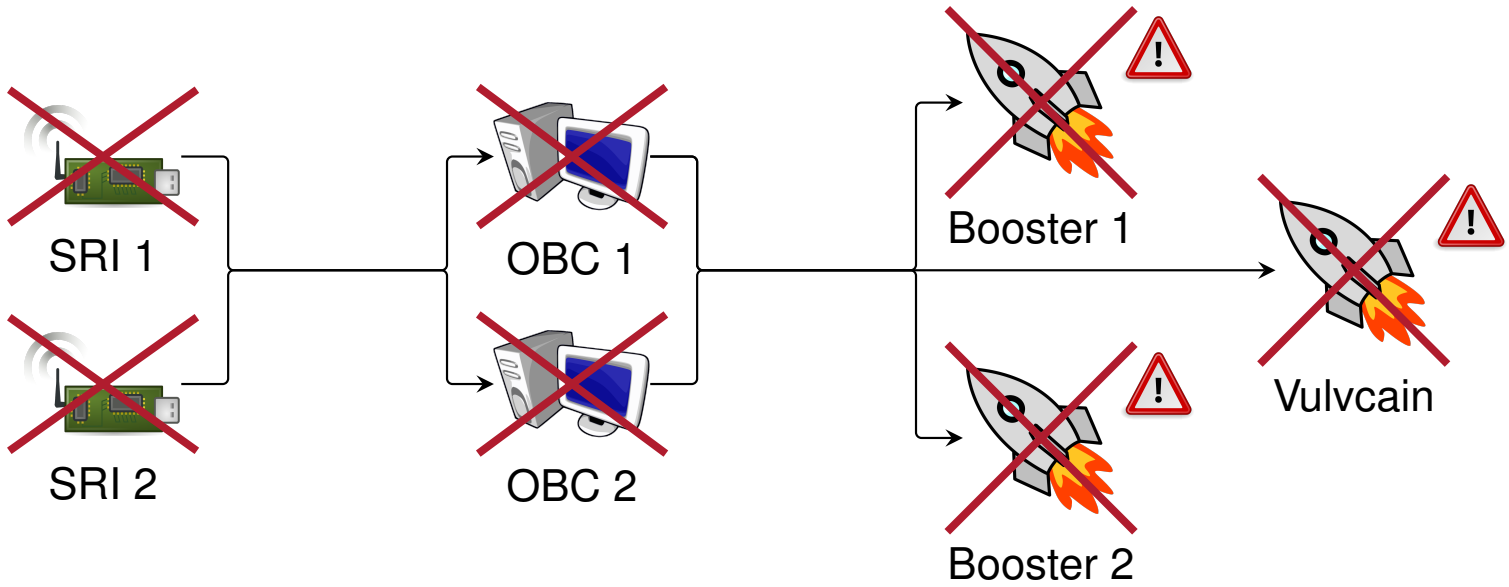
Gliederung

Ariane 5

- ESA-Ministerrat bewilligt die Entwicklung (1987)
  - Nachfolgerin der Ariane 4
    - 60% höhere Nutzlast, bei 90% der Kosten
    - Angestrebte Zuverlässigkeit: 99% bzw. 98,5%
      (für ein- bzw. zweistufige Ariane 5-Variante)
  - Entwicklungskosten: 5,8 Milliarden €
- Technische Merkmale der Grundausführung
  - Zwei Feststoffbooster
    - 238 Tonnen Festtreibstoff, Brenndauer: 130 Sekunden
    - Durchschnittlich 4400 kN (max. 6650 kN) Schub
  - Eine große Hauptstufe
    - 158 Tonnen Treibstoff, Brenndauer: 605 Sekunden
    - Vulcain-Triebwerk: 1180 kN Schub

(Quelle: Ssolbergj)

Ariane 5, Flugnummer 501, 4. Juni 1996



$H_0 + 36,70s$	die Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen aus
$H_0 + 37,00s$	starke Schwenkung der Rakete
$H_0 + 39,10s$	Bordcomputer OBC1 fällt aus
$H_0 + 39,80s$	Nutzlast und Verkleidung wird abgetrennt
$H_0 + 40,25s$	Booster2 wird abgetrennt, Selbstzerstörung eingeleitet
$H_0 + 41,90s$	Bordcomputer OBC2 und Steuer-Telemetrie fallen aus
$H_0 + 43,00s$	Hauptstufen-Telemetrie fällt aus
$H_0 + 66,00s$	manueller Zerstörungsbefehl

Was ist geschehen?

- Unbehandelter Ganzzahlüberlauf im Inertialmesssystem

```
P_M_DERIVE(T_ALG.E_BH) := UC_16S_EN_16NS(TDB.T_ENTIER_16S
                                        ((1.0/C_M_LSB_BH) *
                                        G_M_INFO_DERIVE(T_ALG.E_BH)))
```

  - Bestimmt die Horizontalbeschleunigung als 64-bit Fließkommazahl
  - Konvertiert das Ergebnis in eine 16-bit Ganzzahl
- Folge ist ein Absturz und Ausfall beider Inertialmesssysteme
  - Statt Lageinformation werden nur noch Diagnosenachrichten übertragen
- Bordcomputer interpretieren die Diagnoseinformation falsch
  - Und gehen von einer großen Abweichung der Trajektorie aus

→ Ein fatales Korrekturmanöver wird eingeleitet

  - Die Düsen der Booster und der Hauptstufe werden voll ausgeschwenkt
- Die Ariane 5 hält den enormen Luftwiderstand nicht aus
  - Sie beginnt zu zerbrechen
  - Die automatische Selbstzerstörung wird eingeleitet

Wie konnte das geschehen?

- Warum trat der Ganzzahlüberlauf auf?
  - Betroffene Implementierung wurde von der Ariane 4 übernommen
  - Unterschiedliche Trajektorien von Ariane 4 und Ariane 5
    - → Höhere Horizontalbeschleunigungen und Nickwinkel
    - → Letztendlicher Auslöser für den Überlauf
- Warum wurde der Überlauf nicht behandelt?
  - Beschränkung der CPU-Auslastung auf 80%
    - Nur 4 von 7 Variablen wurden gegen Operandenfehler geschützt
- Warum fielen beide Inertialmesssysteme zugleich aus?
  - SRI1 und SRI2 waren identisch (homogene Redundanz)

→ In SRI1 und SRI2 trat derselbe Überlauf auf

Brisant: eigentlich hätte es das nicht gebraucht . . .

- Kalibrierung liefert nur vor dem Start sinnvolle Daten
  - Nach dem Start werden die Daten nicht mehr benötigt
  - In der Ariane 4 lief die Kalibrierung noch weitere 40 Sekunden
    - In der Ariane 5 gab es diese Anforderung nicht mehr

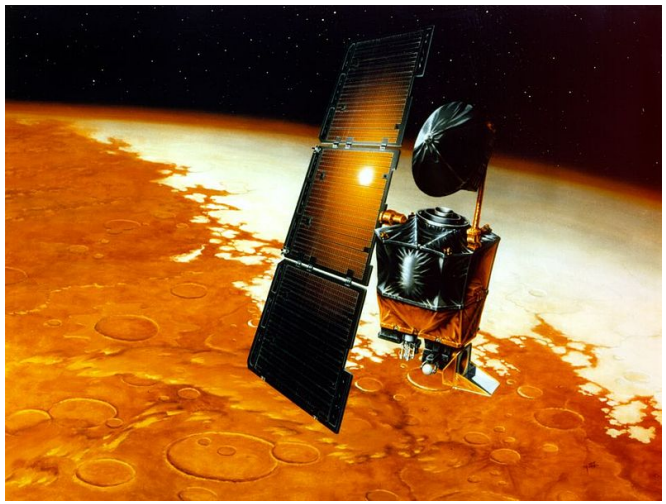
Ariane 5: Resümee

- Beispiel für Fehler bei Entwurf und Auslegung auf Systemebene [3]
  - Anforderungen an das Inertialmesssystem waren fehlerhaft
    - 16 Bit waren einfach zu wenig
  - Homogene Redundanz war in diesem Fall nicht adäquat
    - Sonst hätte man entsprechende Gleichtaktfehler ausschließen müssen
  - Die Kalibrierung hätte nicht mehr ausgeführt werden dürfen
    - Die Anforderung der Ariane 4 existierte bei der Ariane 5 nicht mehr
  - ...
- Konsequenzen: ein sehr, sehr teurer Fehlschlag ...
  - Finanzieller Schaden: ca. 290 Millionen €
  - Verzögerung des Cluster-Programms (Nutzlast) um 4 Jahre
  - Glücklicherweise keine Personenschäden

Gliederung

Mars Climate Orbiter (MCO)

- Mars-Sonde der NASA
  - Experimente/Untersuchungen
    - Marsklima, Marsatmospähre
    - Veränderungen der Marsoberfläche
  - Kommunikationsrelais
    - Für den „Mars Polar Lander“
  - Missionsstart: 11. Dezember 1998
- technische Eckdaten
  - Gewicht: 338 kg
  - Größe: 2,1 m x 1,6 m x 2 m
  - Energieversorgung:
    - Sonnensegel: 5,5 m, 500 W
    - NiH_2-Batterien: 16 Ah
  - Steuerung: Schubdüsen
    - Trajektorie – 4 x 22 N
    - Lage – 4 x 0,9 N

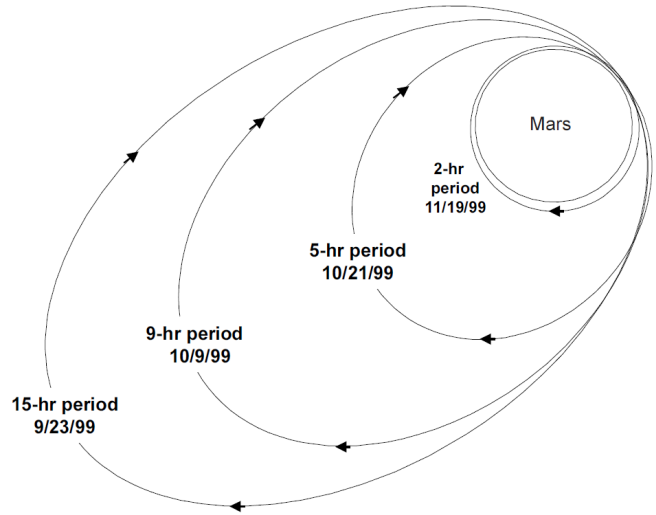


(Quelle: NASA)

- Steuerrechner: IBM RAD6000
  - Takt: 5, 10 oder 20 MHz
  - 128 MB RAM, 18 MB Flash
- Kosten
  - Orbiter&Lander Mission: 327,6 M$
  - Entwicklung: 193,1 M$
  - Start: 91,7 M$
  - Durchführung: 42,8 M$

Eintritt in den Orbit durch „Aerobraking“

- Manöver zum Eintritt in den Orbit
  - „Berühren“ der Mars-Atmosphäre
  - Der MCO wird dadurch abgebremst
  - Sonnensegel verstärkt Bremseffekt
- MCO umkreist den Mars elliptisch
  - Ellipsen ziehen sich enger
    - Aufgrund der Abbremsung
  - Bis kreisförmiger Orbit erreicht ist



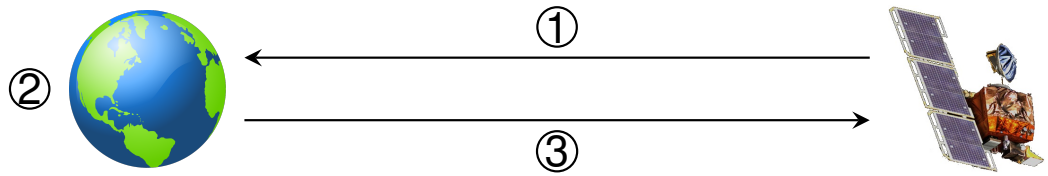
(Quelle: NASA)

- „Trajectory Correction Maneuver 4“ (TCM4) am 8. September 1999
  - Als Vorbereitung auf den Eintritt in den größten elliptischen Orbit
  - Angepeilt war eine erste Periapsisdistanz von ca. 226 km
- „Mars Orbital Insertion“ (MOI) am 23. September 1999
  - Eintritt in den Funkschatten: 09:04:52 UTC, Austritt . . .
- bereits vorher musste man die Periapsisdistanz korrigieren
  - Zwischen TCM4 und MOI: ca. 150km - 170km, 24h vorher: ca. 110km

Was war passiert?

- Die Trajektorie des MCO musste korrigiert werden ⇝ TCM4
  - Grund war vor allem das asymmetrische Sonnensegel

  → Schwungräder auf dem MCO mussten in eine ausgeglichene Lage gebracht werden („Angular Momentum Desaturation“ – AMD)
- Ablauf der Kurskorrektur



1. Bei jedem AMD-Ereignis werden Sensordaten zur Basisstation geschickt
2. Die Daten für die Ansteuerung der Schubdüsen werden berechnet
3. Die Kurskorrektur wird mit den berechneten Daten durchgeführt

Wenn zwei sich nicht verstehen . . .

- MCO ↦ metrische Größen, Bodenstation ↦ imperiale Größen
  - Die Werte unterscheiden sich um den Faktor 4,45
- Kräfte der Schubdüsen wurde um den Faktor 4,45 unterschätzt
  - Überkorrektur der Trajektorie ⇝ Periapsisdistanz von ca. 57 km

Mars Climate Orbiter: Resümee

- Untersuchungskommission: zahlreiche organisatorische Mängel [1]
  - Zu wenig Personal für die Überwachung der Mission
  - Zu wenig erfahrenes Personal
  - ...

☞ Der Fehler hätte korrigiert werden können

  - Auch noch während des Anflugs zum Mars

- Andere Betrachtungsweise aus Informatik-Sicht:

☞ Schnittstellen sollten statisch überprüfbar sein [5]

  - Laut dem Autor – Bjarne Stroustrup – eignet sich dafür natürlich vor allem C++ besonders gut für diese Aufgabe ;-)

Gliederung

Weitere berühmte Softwarefehler

- Fehlfunktion einer MIM-104 Patroit Abwehrrakete [2]
  - 25. Februar 1991, Dhahran - Saudi Arabien (während des Irak-Kriegs)
  - Eintreffende Scud-Rakete wurde nicht erfasst, 28 Soldaten starben
  - Ursache: Rundungsfehler (Konvertierung 0,1 $\mapsto$ Fließkommazahl)
- Stromausfall im Nordosten der USA, 14. August 2003
  - Ein lokaler Stromausfall wurde übersehen
  - Ursache: Race Condition im Überwachungssystem von GE
- „Smart Ship“ USS Yorktown manövrierunfähig, 21. September 1997
  - Ein Besatzungsmitglied tippte direkt eine ’0’ ein
  - Ursache: die folgende „Division durch 0“ verursachte einen Totalabsturz
- Auflistung weiterer berühmter und berüchtigter Softwarefehler
  - `Http://de.wikipedia.org/wiki/Programmfehler`
  - `Http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software_bugs`

Literaturverzeichnis

[1] Board, M. C. O. M. I. ; Laboratory, J. P. ; NASA, U. S.:
Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board: Phase I report / Jet Propulsion Laboratory.
1999. –
Forschungsbericht. –
ftp://ftp.hq.nasa.gov/pub/pao/reports/1999/MCO_report.pdf

[2] Carlone, R. ; Blair, M. ; Obenski, S. ; Bridickas, P. :
Patriot Missile Defense: Software Problme Led to System Failure at Dhahran, Saudi Arabia / United States General Accounting Office.
Washington, D.C. 20548, Febr. 1992 (GAO/IMTEC-92-26). –
Forschungsbericht

[3] Le Lann, G. :
An analysis of the Ariane 5 flight 501 failure – a system engineering perspective.
In: *Proceedings of International Conference and Workshop on Engineering of Computer-Based Systems (ECBS 1997)*.
Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, März 1997. –
ISBN 0–8186–7889–5, S. 339–346

Literaturverzeichnis (Forts.)

[4] Leveson, N. ; Turner, C. :
An investigation of the Therac-25 accidents.
In: *IEEE Computer* 26 (1993), Jul., Nr. 7, S. 18–41.
http://dx.doi.org/10.1109/MC.1993.274940. –
DOI 10.1109/MC.1993.274940. –
ISSN 0018–9162

[5] Stroustrup, B. :
Software Development for Infrastructure.
In: *IEEE Computer* 45 (2012), Jan., Nr. 1, S. 47–58.
http://dx.doi.org/10.1109/MC.2011.353. –
DOI 10.1109/MC.2011.353. –
ISSN 0018–9162