

Verlässliche Echtzeitsysteme

Einleitung

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://www4.cs.fau.de>

14. April 2016



- 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



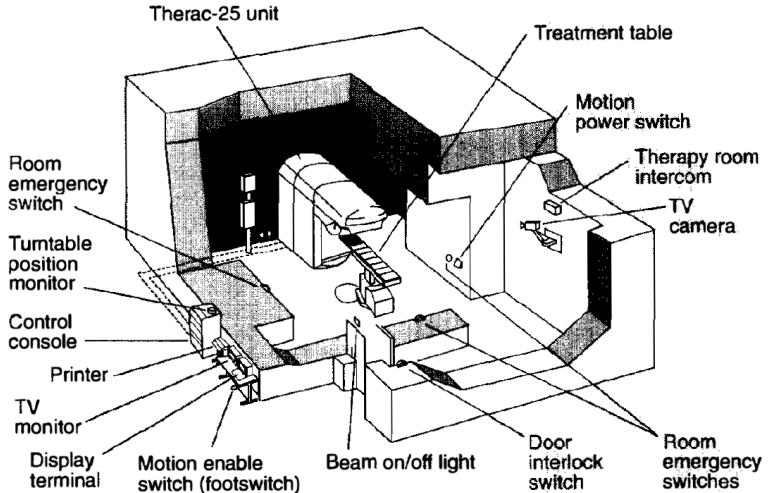
Sicherheitskritische Systeme (engl. *safety-critical systems*)

- 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.



AECL Therac-25

Linearbeschleuniger für den Einsatz in der Strahlentherapie



(Quelle: Nancy Leveson [3])



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

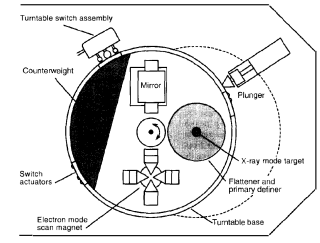
1982 - 1985 Fertigung und Auslieferung

- 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 [3])

Behandlungsablauf

Der Operateur ...

- 1 im Behandlungsraum
 - Patienten ~> Behandlungstisch
 - stellt Strahlengang etc. ein
- 2 verlässt den Behandlungsraum
- 3 am Bedienterminal
 - Eingabe der Behandlungsparameter
 - Behandlungsart, Energieniveau, ...
- 4 Steuerrechner überprüft Eingabe
 - Freigabe im Erfolgsfall



- 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 Operators
 - Initialisierung für die Behandlung (Magnete aktivieren ...)
 - Elektronenstrahl kontrollieren: deaktivieren/aktivieren
- proprietäres Echtzeitbetriebssystem (in Assembler implementiert)
 - vorrangesteuerte, 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 $\leadsto$ 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) $\leadsto$ Malfuction 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 $\leadsto$ Malfuction 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 : T25V02-R03 REASON : OPERATOR      COMMAND:
```

(Quelle: Nancy Leveson [3])

■ 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
- die 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 [3] 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

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

■ Subroutine DataEnt kommuniziert mit der Tastaturbehandlung

- nebenläufig zu Treat $\leadsto$ geteilte Variable DataEntComplete
 - DataEntComplete == 1 $\leadsto$ Tphase = 3: Dateneingabe abgeschlossen
 - sonst: Tphase bleibt unverändert, DataEnt wird erneut ausgeführt
- DataEntComplete == 1 garantiert, dass Endposition erreicht
 - nicht, dass der Cursor noch dort ist $\leadsto$ 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!)



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();  
}
```

■ die Routine DataEnt ...

- setzt Betriebsparameter (↷ siehe meos)
- initialisiert die Ablenkmagnete (↷ Magnet)
- aktualisiert ggf. Tphase

■ die Routine Magnet ...

- initialisiert Magnet für Magnet
 - angezeigt durch das Flag MagnetFlag
- wartet mit Ptime eine Zeitspanne ab
 - ca. 1 Sekunde je Ablenkmagnet
 - ↷ insgesamt ca. 8 Sekunden für 8 Magnete

■ die 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;  
}
```

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



Auslösung: Wechsel des Betriebsmodus

- Operateur kontrolliert die Position des Patienten
 - hierfür wird der Modus „Lichtkegel/Spiegel“ aktiviert
- anschließend: Set-Knopf oder Set-Kommando
 - und zwar genau dann, wenn `Class3` überläuft
- die Fehlstellung des Kollimators wird nicht überprüft/erkannt
 - die Variable `F$mal` hatte den Wert 0 (`Chkcol` wurde nicht aufgerufen)
 - der Elektronenstrahl wurde mit 25 MeV aktiviert

Fehlerbehebung: die Variable `Class3` wird nicht inkrementiert

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



- **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
 - ...



1 Therac-25

2 Ariane 5

3 Weitere berühmte Softwarefehler

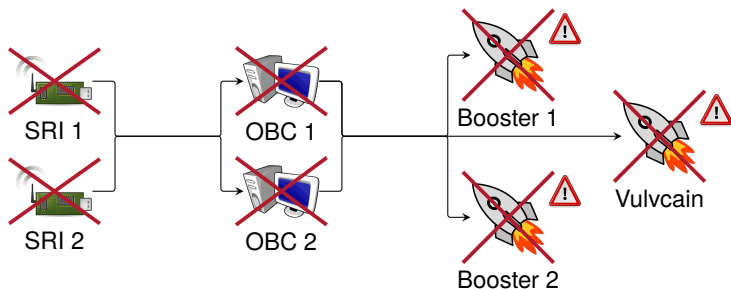


- ESA-Ministerrat bewilligt die Entwicklung (1987)
 - Nachfolgerin der Ariane 4
 - 60% höhere Nutzlast, bei 90% der Kosten
 - angestrebte Zuverlässigkeit: 99% bzw. 98,5% (für ein- bzw. zweistufige Ariane 5-Variante)
 - Entwicklungskosten: 5,8 Milliarden €
- technische Merkmale der Grundausführung
 - zwei Feststoffbooster
 - 238 Tonnen Festtreibstoff, Brenndauer: 130 Sekunden
 - durchschnittlich 4400 kN (max. 6650 kN) Schub
 - eine große Hauptstufe
 - 158 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
- und konvertiert das Ergebnis in eine 16-bit Ganzzahl

■ Folge ist ein Absturz und Ausfall beider Inertialmesssysteme

- statt Lageinformation werden nur noch Diagnosenachrichten übertragen

■ die 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



- Beispiel für Fehler bei **Entwurf und Auslegung auf Systemebene** [2]
 - 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



1 Therac-25

2 Ariane 5

3 Weitere berühmte Softwarefehler



Weitere berühmte Softwarefehler

- Fehlfunktion einer MIM-104 Patriot Abwehrrakete [1]
 - 25. Februar 1991, Dhahran - Saudi Arabien (während des Irak-Kriegs)
 - eintreffende Scud-Rakete wurde nicht erfasst, 28 Soldaten starben
 - **Ursache:** Rundungsfehler (Konvertierung 0,1 $\rightarrow$ 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



- [1] Carlone, R. ; Blair, M. ; Obenski, S. ; Bridickas, P. :
Patriot Missile Defense: Software Problems Led to System Failure at Dhahran, Saudi Arabia / United States General Accounting Office.
Washington, D.C. 20548, Febr. 1992 (GAO/IMTEC-92-26). –
Forschungsbericht
- [2] 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
- [3] 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

