

Verlässliche Echtzeitsysteme

Einleitung

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

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

27. April 2017

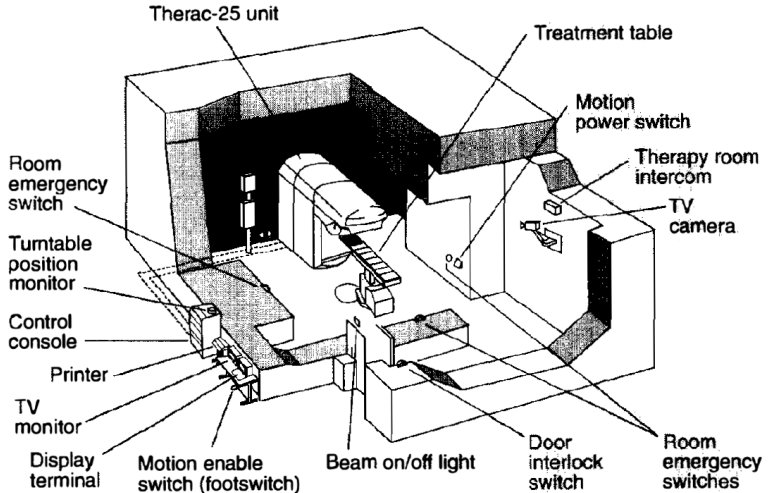


- Echtzeitsysteme sind häufig in unser tägliches Leben eingebettet
 - Interagieren vielfältig und häufig mit anderen Systemen und Menschen
 - Fehlfunktionen können **katastrophale Folgen** haben
 - Gefahr für Leib und Leben, finanzieller Schaden, ...
 - Einsatz erfordert großes Vertrauen in die verwendete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





(Quelle: Nancy Leveson [4])

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**

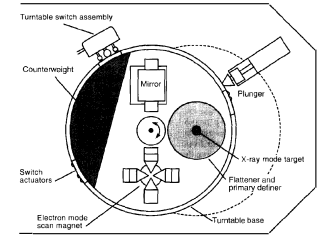
1976 Erster Prototyp ohne Steuerung durch den Kontrollrechner

1982 - 1985 Fertigung und Auslieferung

- Installationen in elf amerikanischen und kanadischen Kliniken



- 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 → 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)

- 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 $\leadsto$ HTILT (NO DOSE) (Operator 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	: 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 $\leadsto$ geteilte Variable DataEntComplete
 - DataEntComplete == 1 $\leadsto$ Tphase = 3: Dateneingabe abgeschlossen
 - Sonst: Tphase bleibt unverändert, DataEnt wird erneut ausgeführt
- DataEntComplete == 1 garantiert, dass Endposition erreicht wurde
 - **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!)

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



```
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 (↪ siehe meos)
- Initialisiert die Ablenkmodule (↪ 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 Ablenkmodule
 - ↪ Insgesamt ca. 8 Sekunden für 8 Module

■ 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



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



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 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 Mars Climate Orbiter

4 Weitere berühmte Softwarefehler

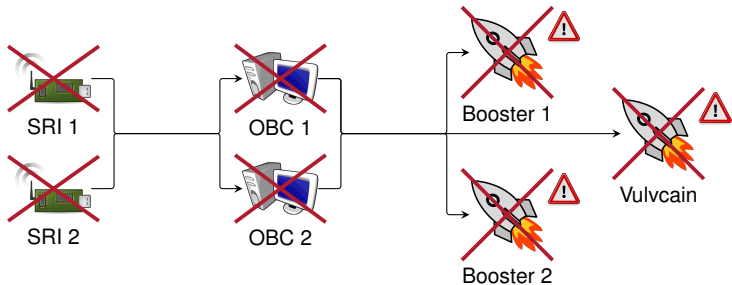


- **ESA-Ministerrat bewilligt die Entwicklung (1987)**
 - **Nachfolgerin der Ariane 4**
 - 60% höhere Nutzlast, bei 90% der Kosten
 - Angestrebte Zuverlässigkeit: 99% bzw. 98,5% (für ein- bzw. zweistufige Ariane 5-Variante)
 - **Entwicklungskosten: 5,8 Milliarden €**
- **Technische Merkmale der Grundaufführung**
 - **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
- 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



- 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



- 1 Therac-25
- 2 Ariane 5
- 3 Mars Climate Orbiter**
- 4 Weitere berühmte Softwarefehler





Mars Climate Orbiter (MCO)

Mars-Sonde der NASA

- Experimente/Untersuchungen
 - Marsklima, Marsatmosphäre
 - 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

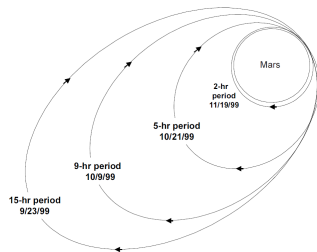
- Orbiter&Lander Mission: 327,6 M\$
- Entwicklung: 193,1 M\$
- Start: 91,7 M\$
- Durchführung: 42,8 M\$





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)

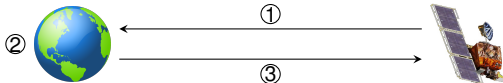
- „Trajectory Correction Maneuver 4“ (TCM4) am 8. September 1999
 - Als Vorbereitung auf den Eintritt in den größten elliptischen Orbit
 - Angepeilt war eine erste Periapsisdistanz von ca. 226 km
- „Mars Orbital Insertion“ (MOI) am 23. September 1999
 - Eintritt in den Funkschatten: 09:04:52 UTC, Austritt ...
- 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 $\leadsto$ TCM4
 - Grund war vor allem das asymmetrische Sonnensegel
 - $\rightarrow$ 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 $\mapsto$ metrische Größen, Bodenstation $\mapsto$ imperiale Größen
 - Die Werte unterscheiden sich um den Faktor 4,45
- Kräfte der Schubdüsen wurde um den Faktor 4,45 unterschätzt
 - Überkorrektur der Trajektorie $\leadsto$ Periapsisdistanz von ca. 57 km





- 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 ;-)



- 1 Therac-25
- 2 Ariane 5
- 3 Mars Climate Orbiter
- 4 Weitere berühmte Softwarefehler**





- Fehlfunktion einer MIM-104 Patriot 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://de.wikipedia.org/wiki/Programmfehler)
 - [Http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software_bugs](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software_bugs)



- [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 Probleme 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



[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

