

Verlässliche Echtzeitsysteme

Einleitung

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

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

25. April 2019



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
- Trägerrakete Ariane 5

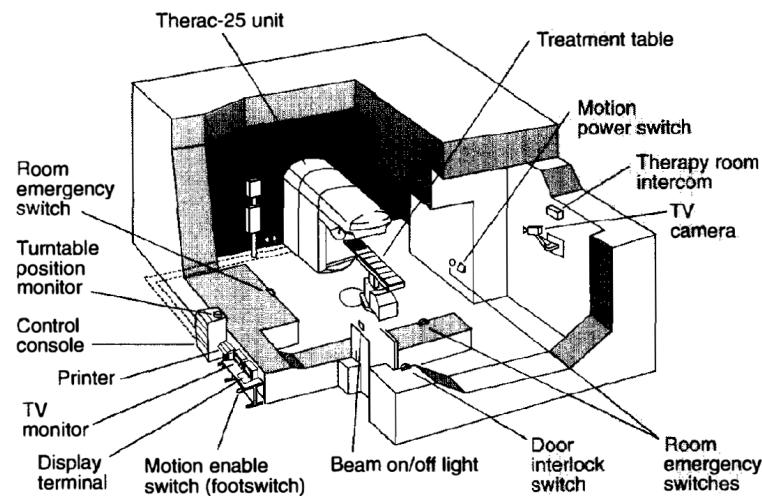
→ II/3 ff.

→ II/16 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

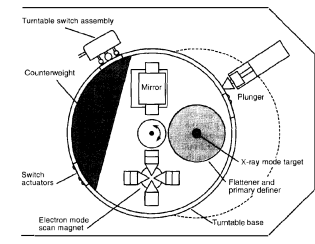
1982 - 1985 Fertigung und Auslieferung

- 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 ~> 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 ~> 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) ~> 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 ~> Malfunction 54
 - Patient beschreibt „Feuer“, „Lichtblitze“, „Geruch von verbranntem“
 - Patient verstirbt 2 Wochen später an Überdosis (~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	BEAM TYPE	: X	ENERGY (MeV)	: 25
TREATMENT MODE	: FIX				
UNIT RATE/MINUTE	0	ACTUAL	0	PREScribed	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 → geteilte Variable DataEntComplete
 - DataEntComplete == 1 → 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 → spätere Eingaben gehen u. U. verloren
 - Dateneingabe wird u. U. beendet, bevor alle Änderungen eingegeben wurden

Tastaturbehandlung sichert Modus → Variable meos

- Byte 0 → Position der Drehscheibe je nach Betriebsmodus
- Byte 1 → 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 (→ siehe meos)
- Initialisiert die Ablenkmagnete (→ 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
 - 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 angerufen)
 - 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

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



Ariane 5

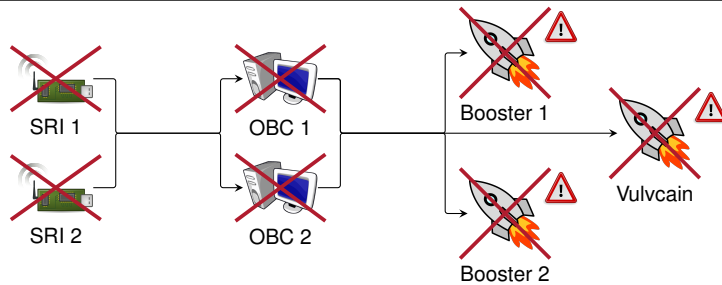
- ESA-Ministerrat bewilligt die Entwicklung (1987)
 - Nachfolgerin der Ariane 4
 - 60% höhere Nutzlast, bei 90% der Kosten
 - Angestrebte Zuverlässigkeit: 99% bzw. 98,5% (für ein- bzw. zweistufige Ariane 5-Variante)
 - Entwicklungskosten: 5,8 Milliarden €
- Technische Merkmale der Grundausrüstung
 -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



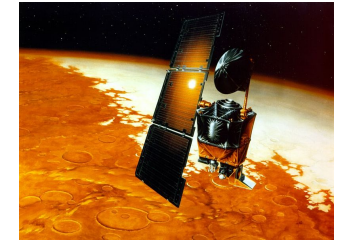
Gliederung

- 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



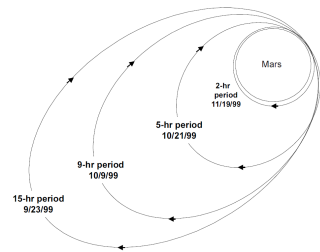
(Quelle: NASA)

- 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 Bremsseffekt
- MCO umkreist den Mars elliptisch
 - Ellipsen ziehen sich enger
 - Aufgrund der Abbremsung
 - Bis kreisförmiger Orbit erreicht ist
- „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

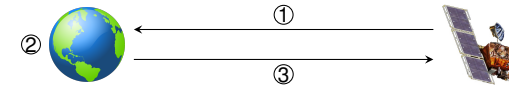


(Quelle: NASA)



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

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



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 → 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)



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 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

