

Verlässliche Echtzeitsysteme

Einleitung

Peter Ulbrich, Peter Wägemann

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

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

KW45 2020



- 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

- 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

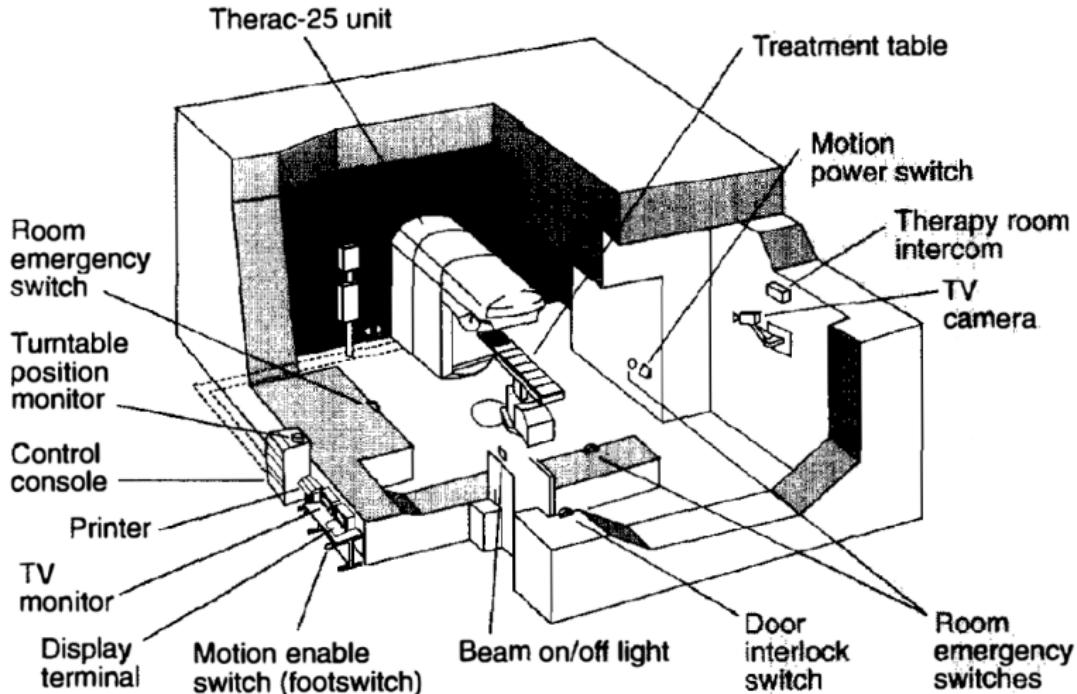
☞ Sicherheitskritische Systeme (engl. *safety-critical systems*)

- Mit hohen Anforderungen an
die **funktionale Sicherheit** (engl. *functional safety*)



- 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

- 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.



(Quelle: Nancy Leveson [6])



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

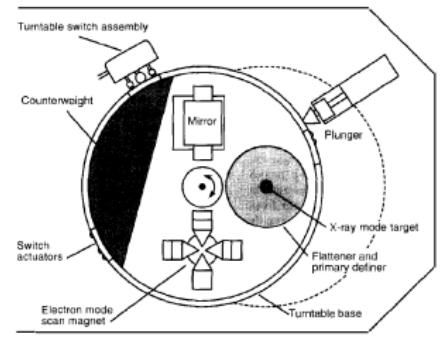
1982 - 1985 Fertigung und Auslieferung

- Installationen in elf amerikanischen und kanadischen Kliniken



Handhabung/Funktionsweise

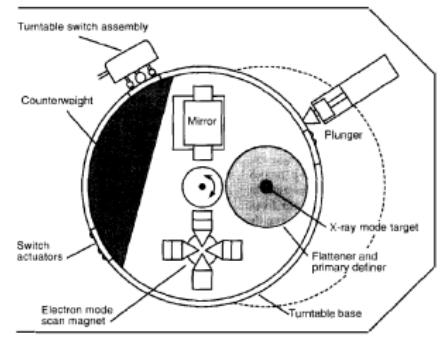
- Gerät unterstützte verschiedene Modi
 - Ausrichtung des Strahlengangs
 - Mithilfe eines Lichtkegels/Spiegels
 - Elektronenstrahlen variablen Energieniveaus
 - Justierung durch Ablenk magnete
 - Röntgenstrahlen (25 MeV)
 - Erzeugt durch ein Wolfram-Target
 - Mit einem Kollimator gebündelt/ausgerichtet



(Quelle: Nancy Leveson [6])

Handhabung/Funktionsweise

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



(Quelle: Nancy Leveson [6])

Behandlungsablauf

Der Operateur ...

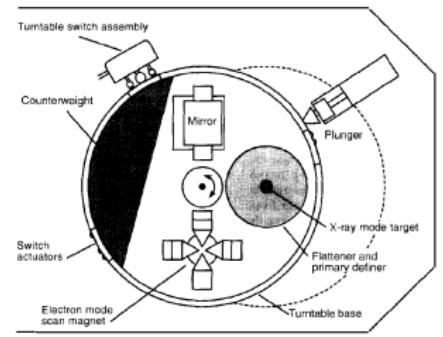
1 Im Behandlungsraum

- Patienten ~ Behandlungstisch
- Stellt Strahlengang etc. ein



Handhabung/Funktionsweise

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



(Quelle: Nancy Leveson [6])

Behandlungsablauf

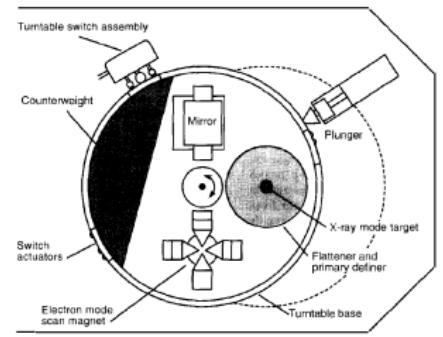
Der Operateur ...

- 1 Im Behandlungsraum
 - Patienten ↘ Behandlungstisch
 - Stellt Strahlengang etc. ein
- 2 Verlässt den Behandlungsraum



Handhabung/Funktionsweise

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



(Quelle: Nancy Leveson [6])

Behandlungsablauf

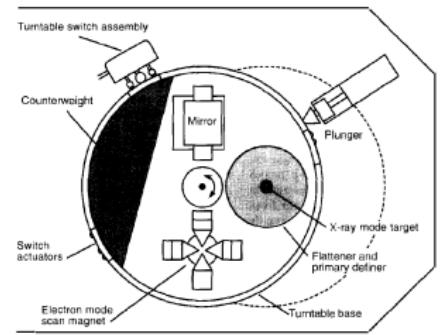
Der Operateur ...

- 1 Im Behandlungsraum
 - Patienten ↘ Behandlungstisch
 - Stellt Strahlengang etc. ein
- 2 Verlässt den Behandlungsraum
- 3 am Bedienterminal
 - Eingabe der Behandlungsparameter
 - Behandlungsart, Energieniveau, ...



Handhabung/Funktionsweise

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



(Quelle: Nancy Leveson [6])

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



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



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



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
- Programmarteakte 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



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



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 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)



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 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 \leadsto Malfunction 54
 - Patient beschreibt „Feuer“, „Lichtblitze“, „Geruch von Verbranntem“
 - Patient verstirbt 2 Wochen später an Überdosis ($\sim 25\,000$ Rad)



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 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 \leadsto 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 [6])

■ 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 [6] 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);  
}
```



Softwarefehler 1: Kritischer Wettlauf (1)

Rekonstruktion [6] 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

```
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 (1)

Rekonstruktion [6] 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);  
}
```



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;  
    }  
}
```

■ Routine DataEnt

- Setzt Betriebsparameter (~ siehe meos)
- Initialisiert die Ablenkmagnete (~ Magnet)
- Aktualisiert ggf. Tphase



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;  
    }  
}
```

■ 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



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



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;  
}
```

- 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



Softwarefehler 2: Ein fataler Ganzzahlüberlauf

```
void Setup_Test() {  
    if(test()) {  
        Class3++;  
    }  
  
    if(F$mal == 0)  
        Tphase = 2;  
  
    return;  
}
```

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

- 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



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



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 augerufen)
→ Der Elektronenstrahl wurde mit 25 MeV 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 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



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
 - ...



- 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)
 - ...

- 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 Operatoren 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 Toyota Camry**
- 5 Boeing 737 Max**
- 6 Weitere berühmte Softwarefehler**

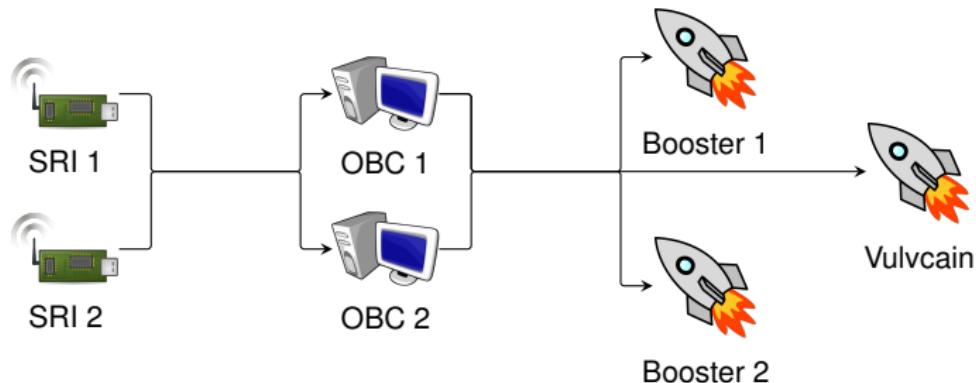


- ESA-Ministerrat bewilligt die Entwicklung (1987)
 - Nachfolgerin der Ariane 4
 - 60% höhere Nutzlast, bei 90% der Kosten
 - Angestrebte Zuverlässigkeit: 99% bzw. 98,5%
(für ein- bzw. zweistufige Ariane 5-Variante)
 - Entwicklungskosten: 5,8 Milliarden €
- Technische Merkmale der Grundausführung
 -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

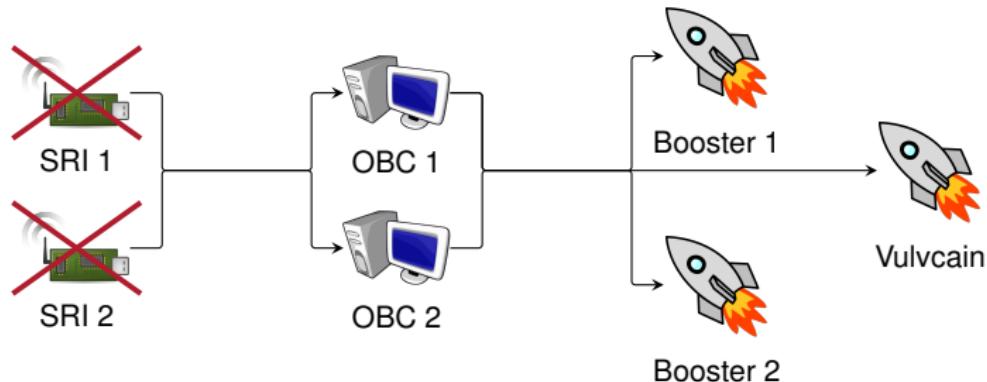


(Quelle: Ssolbergj)

Ariane 5, Flugnummer 501, 4. Juni 1996



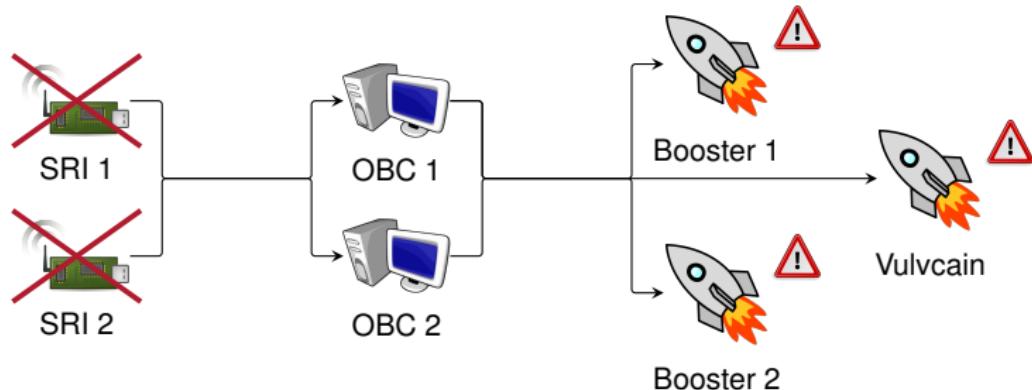
Ariane 5, Flugnummer 501, 4. Juni 1996



$H_0 + 36,70\text{s}$ die Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen aus



Ariane 5, Flugnummer 501, 4. Juni 1996

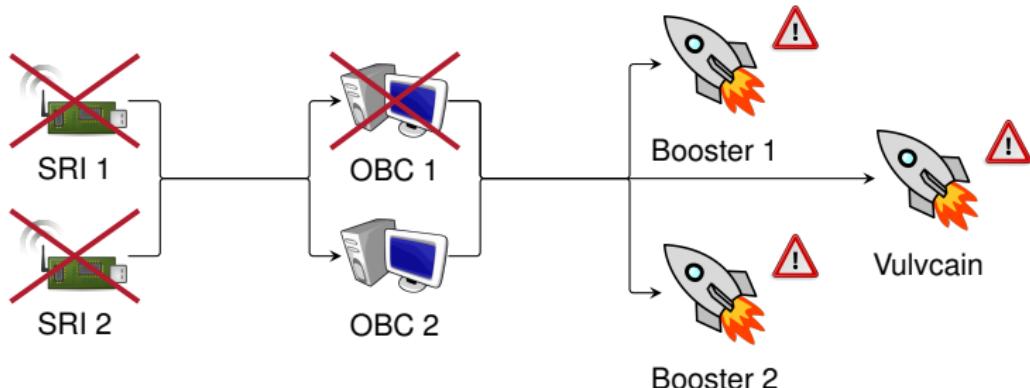


$H_0 + 36,70\text{s}$ die Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen aus

$H_0 + 37,00\text{s}$ starke Schwenkung der Rakete



Ariane 5, Flugnummer 501, 4. Juni 1996



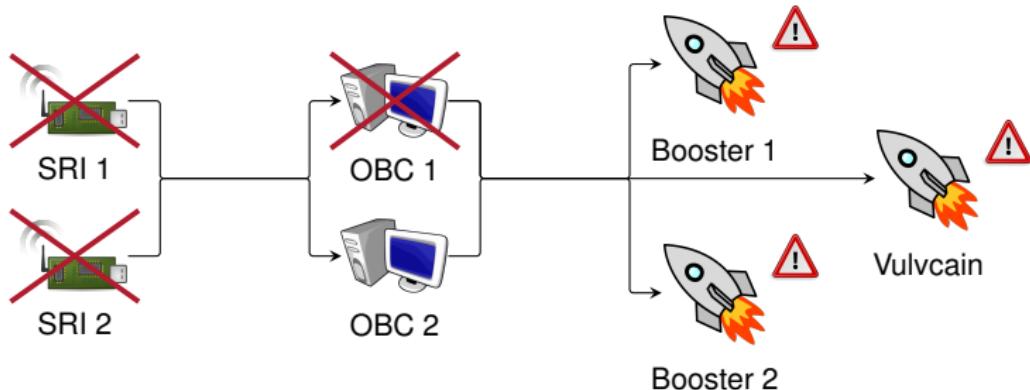
$H_0 + 36,70\text{s}$ die Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen aus

$H_0 + 37,00\text{s}$ starke Schwenkung der Rakete

$H_0 + 39,10\text{s}$ Bordcomputer OBC1 fällt aus



Ariane 5, Flugnummer 501, 4. Juni 1996



$H_0 + 36,70\text{s}$ die Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen aus

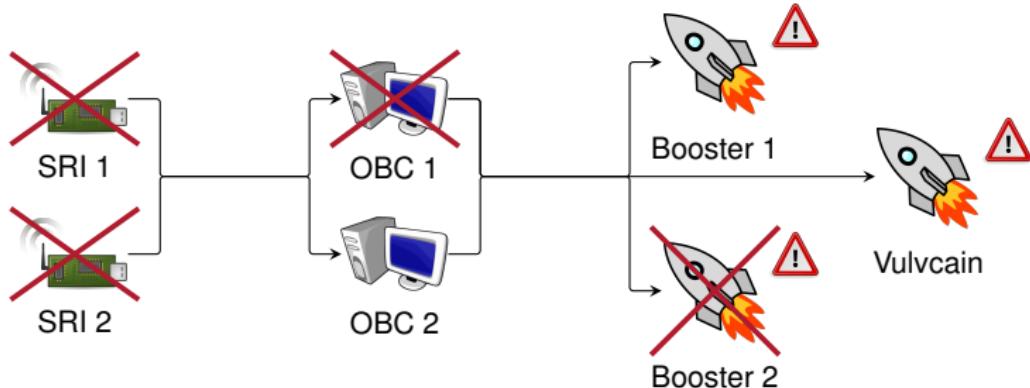
$H_0 + 37,00\text{s}$ starke Schwenkung der Rakete

$H_0 + 39,10\text{s}$ Bordcomputer OBC1 fällt aus

$H_0 + 39,80\text{s}$ Nutzlast und Verkleidung wird abgetrennt



Ariane 5, Flugnummer 501, 4. Juni 1996



$H_0 + 36,70\text{s}$ die Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen aus

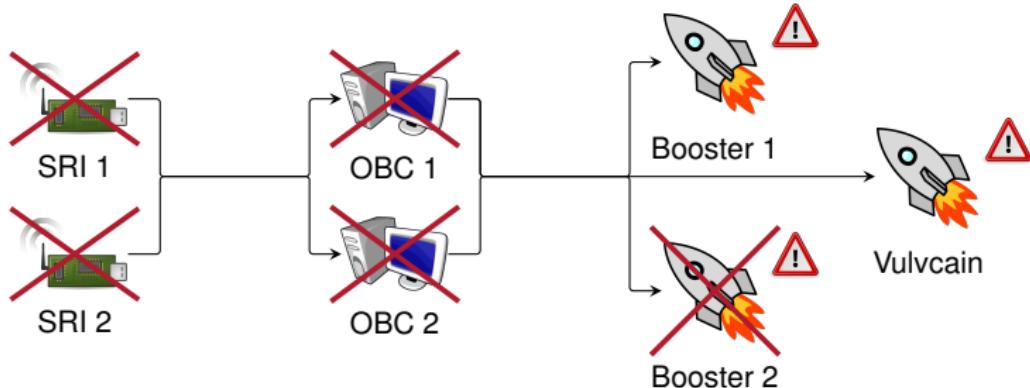
$H_0 + 37,00\text{s}$ starke Schwenkung der Rakete

$H_0 + 39,10\text{s}$ Bordcomputer OBC1 fällt aus

$H_0 + 39,80\text{s}$ Nutzlast und Verkleidung wird abgetrennt

$H_0 + 40,25\text{s}$ Booster2 wird abgetrennt, Selbstzerstörung eingeleitet

Ariane 5, Flugnummer 501, 4. Juni 1996



$H_0 + 36,70\text{s}$ die Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen aus

$H_0 + 37,00\text{s}$ starke Schwenkung der Rakete

$H_0 + 39,10\text{s}$ Bordcomputer OBC1 fällt aus

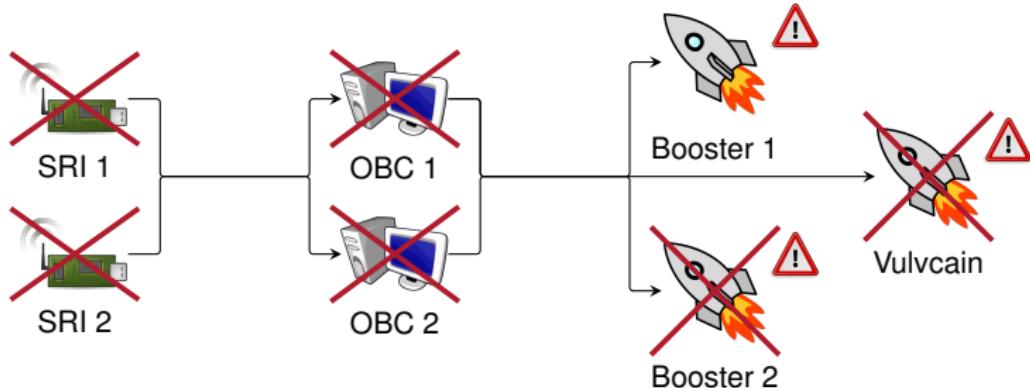
$H_0 + 39,80\text{s}$ Nutzlast und Verkleidung wird abgetrennt

$H_0 + 40,25\text{s}$ Booster2 wird abgetrennt, Selbstzerstörung eingeleitet

$H_0 + 41,90\text{s}$ Bordcomputer OBC2 und Steuer-Telemetrie fallen aus



Ariane 5, Flugnummer 501, 4. Juni 1996



$H_0 + 36,70\text{s}$ die Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen aus

$H_0 + 37,00\text{s}$ starke Schwenkung der Rakete

$H_0 + 39,10\text{s}$ Bordcomputer OBC1 fällt aus

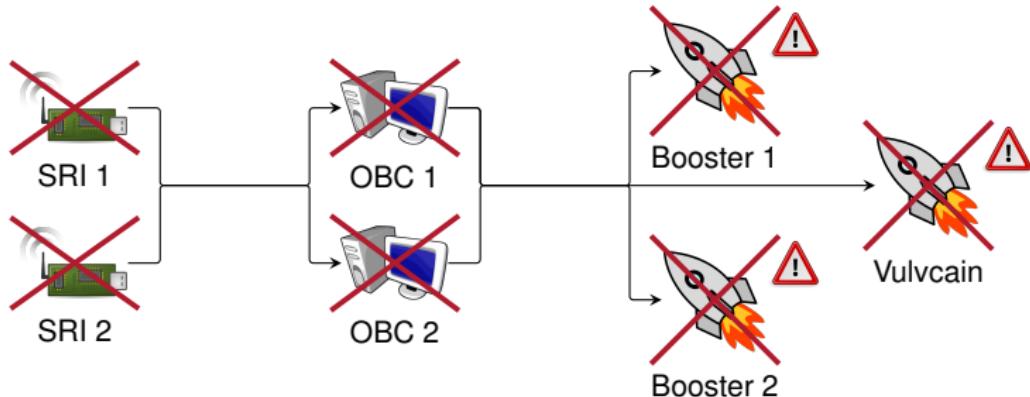
$H_0 + 39,80\text{s}$ Nutzlast und Verkleidung wird abgetrennt

$H_0 + 40,25\text{s}$ Booster2 wird abgetrennt, Selbstzerstörung eingeleitet

$H_0 + 41,90\text{s}$ Bordcomputer OBC2 und Steuer-Telemetrie fallen aus

$H_0 + 43,00\text{s}$ Hauptstufen-Telemetrie fällt aus

Ariane 5, Flugnummer 501, 4. Juni 1996



$H_0 + 36,70\text{s}$ die Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen aus

$H_0 + 37,00\text{s}$ starke Schwenkung der Rakete

$H_0 + 39,10\text{s}$ Bordcomputer OBC1 fällt aus

$H_0 + 39,80\text{s}$ Nutzlast und Verkleidung wird abgetrennt

$H_0 + 40,25\text{s}$ Booster2 wird abgetrennt, Selbstzerstörung eingeleitet

$H_0 + 41,90\text{s}$ Bordcomputer OBC2 und Steuer-Telemetrie fallen aus

$H_0 + 43,00\text{s}$ Hauptstufen-Telemetrie fällt aus

$H_0 + 66,00\text{s}$ 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



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



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



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



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



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



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** [5]
 - 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
 - ...



- Beispiel für Fehler bei **Entwurf und Auslegung auf Systemebene** [5]
 - 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 Toyota Camry
- 5 Boeing 737 Max
- 6 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



(Quelle: NASA)

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
 - NiH₂-Batterien: 16 Ah
 - Steuerung: Schubdüsen
 - Trajektorie – 4 x 22 N
 - Lage – 4 x 0,9 N



(Quelle: NASA)

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
 - NiH₂-Batterien: 16 Ah
 - Steuerung: Schubdüsen
 - Trajektorie – 4 x 22 N
 - Lage – 4 x 0,9 N



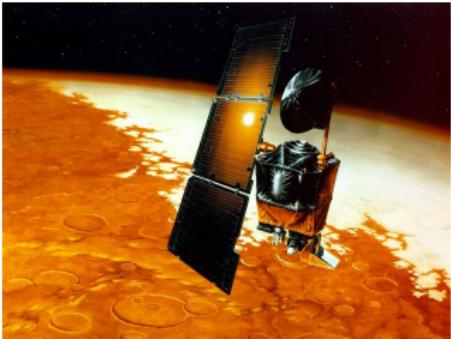
(Quelle: NASA)

- Steuerrechner: IBM RAD6000
 - Takt: 5, 10 oder 20 MHz
 - 128 MB RAM, 18 MB Flash



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
 - NiH₂-Batterien: 16 Ah
 - Steuerung: Schubdüsen
 - Trajektorie – 4 x 22 N
 - Lage – 4 x 0,9 N



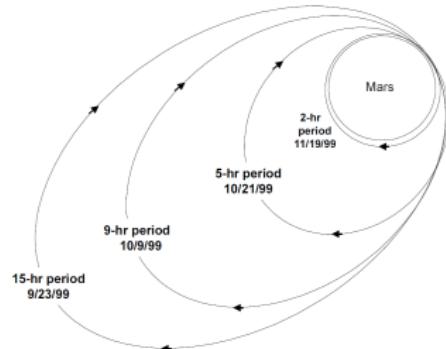
(Quelle: NASA)

- 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“

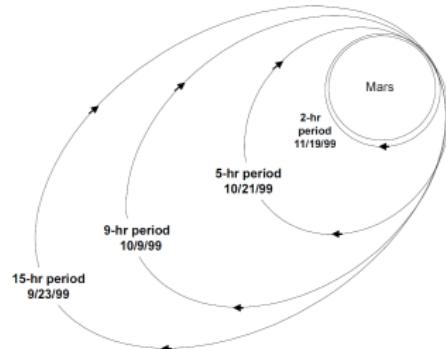
- Manöver zum Eintritt in den Orbit
 - „Berühren“ der Mars-Atmosphäre
 - Der MCO wird dadurch abgebremst
 - Sonnensegel verstärkt Bremseffekt
- MCO umkreist den Mars elliptisch
 - Ellipsen ziehen sich enger
 - Aufgrund der Abbremsung
 - Bis kreisförmiger Orbit erreicht ist



(Quelle: NASA)

Eintritt in den Orbit durch „Aerobraking“

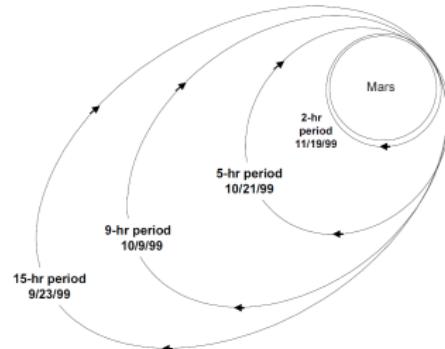
- Manöver zum Eintritt in den Orbit
 - „Berühren“ der Mars-Atmosphäre
 - Der MCO wird dadurch abgebremst
 - Sonnensegel verstärkt Bremseffekt
- MCO umkreist den Mars elliptisch
 - Ellipsen ziehen sich enger
 - Aufgrund der Abbremsung
 - Bis kreisförmiger Orbit erreicht ist
- „Trajectory Correction Maneuver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



(Quelle: NASA)

Eintritt in den Orbit durch „Aerobraking“

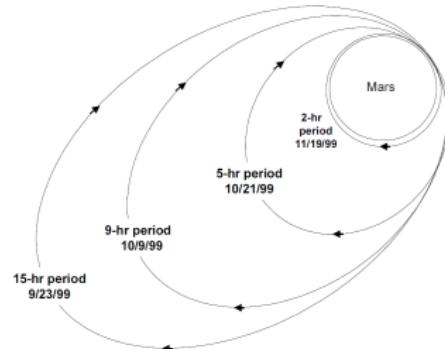
- Manöver zum Eintritt in den Orbit
 - „Berühren“ der Mars-Atmosphäre
 - Der MCO wird dadurch abgebremst
 - Sonnensegel verstärkt Bremseffekt
- MCO umkreist den Mars elliptisch
 - Ellipsen ziehen sich enger
 - Aufgrund der Abbremsung
 - Bis kreisförmiger Orbit erreicht ist
- „Trajectory Correction Maneuver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



(Quelle: NASA)

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
- „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 \leadsto TCM4
 - Grund war vor allem das asymmetrische Sonnensegel
 - Schwungräder auf dem MCO mussten in eine ausgeglichene Lage gebracht werden („Angular Momentum Desaturation“ – AMD)



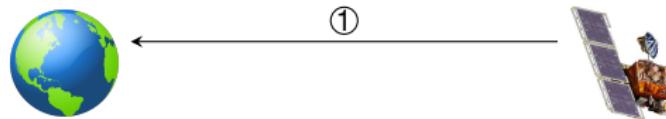
Was war passiert?

- Die Trajektorie des MCO musste korrigiert werden \leadsto 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



Was war passiert?

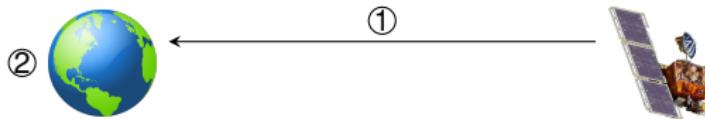
- Die Trajektorie des MCO musste korrigiert werden \leadsto TCM4
 - Grund war vor allem das asymmetrische Sonnensegel
 - Schwungräder auf dem MCO mussten in eine ausgeglichene Lage gebracht werden („Angular Momentum Desaturation“ – AMD)
- Ablauf der Kurskorrektur



- 1 Bei jedem AMD-Ereignis werden Sensordaten zur Basisstation geschickt

Was war passiert?

- Die Trajektorie des MCO musste korrigiert werden \leadsto 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

Was war passiert?

- Die Trajektorie des MCO musste korrigiert werden \leadsto 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

Was war passiert?

- Die Trajektorie des MCO musste korrigiert werden \leadsto 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 \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

Mars Climate Orbiter: Resümee

- Untersuchungskommission: zahlreiche organisatorische Mängel [2]
 - 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



Mars Climate Orbiter: Resümee

- Untersuchungskommission: zahlreiche organisatorische Mängel [2]
 - 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 [8]



Mars Climate Orbiter: Resümee

- Untersuchungskommission: zahlreiche organisatorische Mängel [2]
 - 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 [8]
 - 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 Toyota Camry
- 5 Boeing 737 Max
- 6 Weitere berühmte Softwarefehler



Toyota – ungewollte Beschleunigungen



- Toyota Camry L4 (2005)
- Ungewollten Beschleunigungen (engl. unintended acceleration)
- 89 Opfer [4]

Toyota – ungewollte Beschleunigungen



- Toyota Camry L4 (2005)
- Ungewollten Beschleunigungen (engl. unintended acceleration)
- 89 Opfer [4]
- Nachträgliche Analyse der Software: NASA, Barr Group [1]
- Fehlende Mechanismen zur Härtung
 - Keine redundante Ausführung
 - Kein ECC-Speicher
 - Keine manuelle Duplizierung einiger kritischer Variablen
 - Kein Speicherschutz (MPU)



Typ von Software-Defekt

- Puffer-Überläufe



Typ von Software-Defekt

- Puffer-Überläufe
- Ungültige Pointer & fehlerhafte Zeigerarithmetik



Typ von Software-Defekt

- Puffer-Überläufe
- Ungültige Pointer & fehlerhafte Zeigerarithmetik
- Nebenläufigkeitsprobleme



Typ von Software-Defekt

- Puffer-Überläufe
- Ungültige Pointer & fehlerhafte Zeigerarithmetik
- Nebenläufigkeitsprobleme
- Unsicheres Casting



Typ von Software-Defekt

- Puffer-Überläufe
- Ungültige Pointer & fehlerhafte Zeigerarithmetik
- Nebenläufigkeitsprobleme
- Unsicheres Casting
- Stack-Überläufe (und fehlende Laufzeitüberwachung des Stacks)



- McCabe's Cyclomatic Complexity (MCC-Werte kleiner 10 sind akzeptabel)
- 67 Funktionen > 50
- Funktion zur Bestimmung des Gaspedalwinkels: MCC > 100



- McCabe's Cyclomatic Complexity (MCC-Werte kleiner 10 sind akzeptabel)
- 67 Funktionen > 50
- Funktion zur Bestimmung des Gaspedalwinkels: MCC > 100
- MISRA-C Regeln missachtet
 - Verwendung von Rekursion
 - Verwendung von Funktionszeigern
- 80000 Verletzungen von MISRA-C-Regeln
- Unzureichende Testüberdeckung

- McCabe's Cyclomatic Complexity (MCC-Werte kleiner 10 sind akzeptabel)
- 67 Funktionen > 50
- Funktion zur Bestimmung des Gaspedalwinkels: MCC > 100
- MISRA-C Regeln missachtet
 - Verwendung von Rekursion
 - Verwendung von Funktionszeigern
- 80000 Verletzungen von MISRA-C-Regeln
- Unzureichende Testüberdeckung
- Fehlerhafte Analyse des Worst-Case-Stackverbrauchs
 - Teile von Bibliotheksfunktionen nicht mit analysiert



- McCabe's Cyclomatic Complexity (MCC-Werte kleiner 10 sind akzeptabel)
- 67 Funktionen > 50
- Funktion zur Bestimmung des Gaspedalwinkels: MCC > 100
- MISRA-C Regeln missachtet
 - Verwendung von Rekursion
 - Verwendung von Funktionszeigern
- 80000 Verletzungen von MISRA-C-Regeln
- Unzureichende Testüberdeckung
- Fehlerhafte Analyse des Worst-Case-Stackverbrauchs
 - Teile von Bibliotheksfunktionen nicht mit analysiert
- Fehlende OSEK-Kompatibilität



Softwareentwicklungsprozesse mangelhaft

- Fehlende Peer-Reviews von Code
- Kein Bug-Tracking
- Fehlender Source-Code (von Funktionalität auf überwachender CPU)
- Fehlendes Wissen bei Entwicklung nach V-Modell



Softwareentwicklungsprozesse mangelhaft

- Fehlende Peer-Reviews von Code
- Kein Bug-Tracking
- Fehlender Source-Code (von Funktionalität auf überwachender CPU)
- Fehlendes Wissen bei Entwicklung nach V-Modell

Watchdog-Design unzulänglich

- Mechanismus: regelmäßiges Zurücksetzen von Timer
- Ziel: Überlastsituationen, Aufgaben ohne Fortschritt erkennen
- Camry L4: fehlerhafte Watchdog-Verwendung
 - Überlast-Situationen bis 1,5 Sekunden
 - Zurücksetzen von Watchdog in Timer-Interrupt



- 1 Therac-25
- 2 Ariane 5
- 3 Mars Climate Orbiter
- 4 Toyota Camry
- 5 Boeing 737 Max
- 6 Weitere berühmte Softwarefehler



- 2018, 189 Opfer, Indonesien
- 2019, 157 Opfer, Äthiopien
- *Boeing Was ‘Go, Go, Go’ to Beat Airbus With the 737 Max [7]*
- Konkurrenzprodukt: Airbus A320 neo
- Boeing: effizientere, aber größere Turbine an existierende 737-8
- Korrektur der Flugeigenschaften: Maneuvering Characteristics Augmentation System (MCAS)



Boeing 737 Max – MCAS



- Flugverhalten: Flugzeug neigt standardmäßig nach oben
- Ziel: Flugverhalten von 737 nachahmen
- Alternative: Schulungen der Piloten
- MCAS: Korrektur der Fluglage
- Angle-of-Attack-Sensor (Neigungswinkel) überschreiben
- Kritische Bruchstelle: Sensor

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Southwest_Airlines,_Boeing_737-8_MAX,_N8709Q_horizontal_stabilizer.jpg

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Angle_attack_sensor_hg.jpg



- 1 Therac-25**
- 2 Ariane 5**
- 3 Mars Climate Orbiter**
- 4 Toyota Camry**
- 5 Boeing 737 Max**
- 6 Weitere berühmte Softwarefehler**

Weitere berühmte Softwarefehler

- Fehlfunktion einer MIM-104 Patriot Abwehr ракете [3]
 - 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



Weitere berühmte Softwarefehler

- Fehlfunktion einer MIM-104 Patriot Abwehr ракете [3]
 - 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://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] Barr, M. :
Bookout V. Toyota – 2005 Camry L4 Software Analysis.
<https://web.archive.org/web/20140228020145/http://www.sddt.com/files/BARR-SLIDES.pdf>, 2013
- [2] 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
- [3] Carbone, R. ; Blair, M. ; Obenski, S. ; Bridickas, P. :
Patriot Missile Defense: Software Problem Led to System Failure at Dhahran, Saudi Arabia /
United States General Accounting Office.
Washington, D.C. 20548, Febr. 1992 (GAO/IMTEC-92-26). –
Forschungsbericht
- [4] CBS News:
Toyota Unintended Acceleration"Has Killed 89.
<https://www.cbsnews.com/news/toyota-unintended-acceleration-has-killed-89/>, 2010

[5] 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

[6] 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

[7] New York Times:

Boeing Was 'Go, Go, Go' to Beat Airbus With the 737 Max.
<https://www.nytimes.com/2019/03/23/business/boeing-737-max-crash.html>, 2019

[8] 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