

Verlässliche Echtzeitsysteme

Redundanz und Fehlertoleranz

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

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

11. Mai 2017





Ungehemmte Fehlerfortpflanzung führt zum Systemversagen

- Unerkannte Datenfehler (engl. *silent data corruption*) (vgl. III/10)
 - Bedingen beispielsweise fehlerhafte Stellwerte für Akteure
 - Ihre Folgen treten häufig räumlich und zeitlich unkorreliert auf
- Erkannte, unkorrigierbare Fehler (engl. *detected unrecoverable errors*)
 - Führen zu einem unmittelbaren, erkennbaren Systemversagen





Ungehemmte Fehlerfortpflanzung führt zum Systemversagen

- Unerkannte Datenfehler (engl. *silent data corruption*) (vgl. III/10)
 - Bedingen beispielsweise fehlerhafte Stellwerte für Akteure
 - Ihre Folgen treten häufig räumlich und zeitlich unkorreliert auf
- Erkannte, unkorrigierbare Fehler (engl. *detected unrecoverable errors*)
 - Führen zu einem unmittelbaren, erkennbaren Systemversagen



Vermeidung dieser Fehler ist erforderlich

- **Problematik:** Robuste Auslegung aller Komponenten ist häufig nicht möglich
 - Diese müssten frei von **konzeptionellen Fehler** sein
(→ keinerlei Hardware- oder Softwaredefekte)
 - Sie müsste widrigen **äußereren Umständen** trotzen
- **Lösung:** Ein System, welches **Fehler tolerieren kann**
 - Einzelne Komponenten (HW/SW) können (dürfen) ausfallen
 - Dies wird durch andere **redundante Komponenten** aufgefangen
 - Die gewünschte Funktionalität an der Schnittstelle bleibt erhalten
 - Der Anwender bekommt davon möglichst nichts mit (↔ **Transparenz**)



- Redundanz als Grundlage von Fehlertoleranz
 - Welche Arten von Redundanz existieren?
 - Welche Eigenschaften verknüpfen sich hiermit?
 - Auf welcher Ebene wird Redundanz angewandt?
- Hardwarebasierte Replikation
 - Klassische Lösung für die Auslegung fehlertoleranter Systeme
 - Replikation auf Ebene des Knotens bzw. der Hardware
 - Fokussierung auf Triple Modular Redundancy
- Softwarebasierte Replikation
 - Process-Level Redundancy: Zuhilfenahme von Mehrkernprozessoren
 - Replikation auf Ebene von Prozessen bzw. Software
 - Maskierung transienter Hardwarefehler durch redundante Ausführung
- Vermeidung von Gleichtaktfehlern durch Diversität
 - „Replizierte Entwicklung“ der einzelnen Redundanzen



1 Grundlagen

- Arten von Redundanz
- Einsatz von Redundanz

2 Strukturelle Redundanz

- Replikation
- Fehlerhypothese
- Voraussetzungen
- Nutzen
- Kritische Bruchstellen

3 Umsetzungsalternativen und Beispiele

- Hardwarebasierte Replikation
- Softwarebasierte Replikation

4 Diversität



- Fehlererkennung (engl. *fault detection*)
 - Erkennen von Fehlern z. B. mithilfe von Prüfsummen
- Fehlerdiagnose (engl. *fault diagnosis*)
 - Identifikation der fehlerhaften (redundanten) Einheit
- Fehlereindämmung (engl. *fault containment*)
 - Verhindern, dass sich ein Fehler über gewisse Grenzen ausbreitet
- Fehlermaskierung (engl. *fault masking*)
 - Dynamische Korrektur von Fehlern z. B. durch Mehrheitsentscheid
- Wiederaufsetzen (engl. *recovery*)
 - Wiederherstellen eines funktionsfähigen Zustands nach Fehlern
 - Reparatur (engl. *repair*) bzw. Rekonfiguration (engl. *reconfiguration*)



Fokus der Vorlesung: Fehlererkennung und Fehlermaskierung





Arten von Redundanz



Redundanz ist eine **Grundvoraussetzung** für Fehlertoleranz





Arten von Redundanz



Redundanz ist eine **Grundvoraussetzung** für Fehlertoleranz



Strukturelle Redundanz (dieses Kapitel)

→ Bereitstellung mehrerer **gleichartiger** Komponenten

- **Replikation** ~> (typisch) hardwarebasierte Fehlertoleranzlösungen
- **Mehrfache Auslegung:** Prozessoren, Speicher, Sensoren, Aktoren, ...





Redundanz ist eine **Grundvoraussetzung** für Fehlertoleranz



Strukturelle Redundanz (dieses Kapitel)

- Bereitstellung mehrerer **gleichartiger** Komponenten
 - **Replikation** ~ (typisch) hardwarebasierte Fehlertoleranzlösungen
 - **Mehrfache Auslegung**: Prozessoren, Speicher, Sensoren, Aktoren, ...



Funktionelle Redundanz

- Bereitstellung mehrerer **verschiedenartiger** Komponenten
 - Mehrfache Herleitung desselben Sachverhalt auf verschiedenen Wegen
 - Ventilstellung ~ Stellungsgeber bzw. Durchflussmengenmesser
 - Funktionswächter (engl. *watchdog*) für bestimmte Parameter





Arten von Redundanz



Redundanz ist eine **Grundvoraussetzung** für Fehlertoleranz



Strukturelle Redundanz (dieses Kapitel)

- Bereitstellung mehrerer **gleichartiger** Komponenten
 - **Replikation** ~> (typisch) hardwarebasierte Fehlertoleranzlösungen
 - **Mehrfache Auslegung**: Prozessoren, Speicher, Sensoren, Aktoren, ...



Funktionelle Redundanz

- Bereitstellung mehrerer **verschiedenartiger** Komponenten
 - Mehrfache Herleitung desselben Sachverhalt auf verschiedenen Wegen
 - Ventilstellung ~> Stellungsgeber bzw. Durchflussmengenmesser
 - Funktionswächter (engl. *watchdog*) für bestimmte Parameter



Informationsredundanz (vgl. Kapitel 5)

- Einbringung zusätzlicher Informationen/Daten (nicht zwingend erforderlich)
 - Speicherung von **Brutto-** und **Nettobetrag**
 - Typischerweise in Form von **Codierung** (Prüfsummen, CRC, ...)





Arten von Redundanz



Redundanz ist eine **Grundvoraussetzung** für Fehlertoleranz



Strukturelle Redundanz (dieses Kapitel)

- Bereitstellung mehrerer **gleichartiger** Komponenten
 - **Replikation** ~ (typisch) hardwarebasierte Fehlertoleranzlösungen
 - **Mehrfache Auslegung**: Prozessoren, Speicher, Sensoren, Aktoren, ...



Funktionelle Redundanz

- Bereitstellung mehrerer **verschiedenartiger** Komponenten
 - Mehrfache Herleitung desselben Sachverhalt auf verschiedenen Wegen
 - Ventilstellung ~ Stellungsgeber bzw. Durchflussmengenmesser
 - Funktionswächter (engl. **watchdog**) für bestimmte Parameter



Informationsredundanz (vgl. Kapitel 5)

- Einbringung zusätzlicher Informationen/Daten (nicht zwingend erforderlich)
 - Speicherung von **Brutto-** und **Nettobetrag**
 - Typischerweise in Form von **Codierung** (Prüfsummen, CRC, ...)

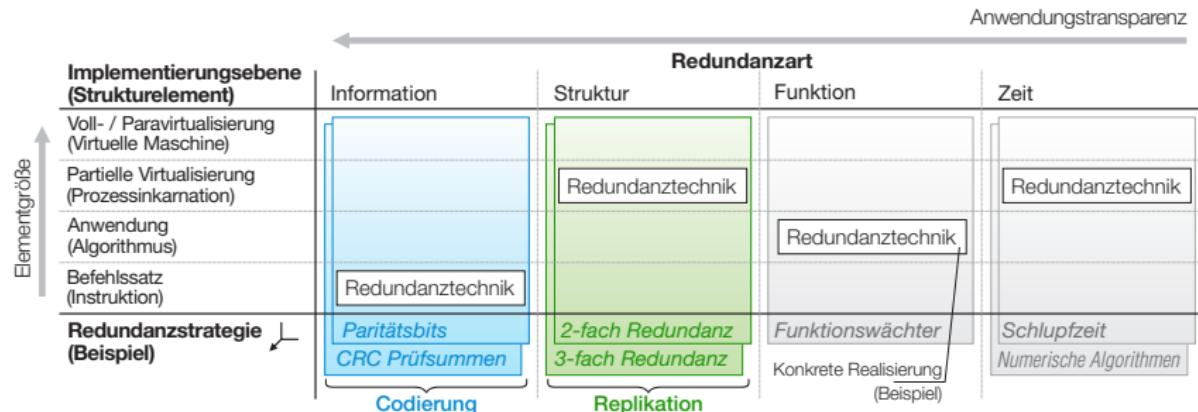


Zeitliche Redundanz

- Bereitstellung von über den Normalbetrieb hinausgehender Zeit
 - Z.B. Numerische Algorithmen, Schlupf in einem EZS, ...



Koordinierter Einsatz von Redundanz



Erst der koordinierte Einsatz von Redundanz ermöglicht Fehlertoleranz



In VEZS: Klassifizierung nach Fehlererkennung (\neq Literatur)

■ Es existieren viele **Implementierungsalternativen**

- Implementierungsebene (vgl. Sichtbarkeit Folien III/7 ff)
- Art der Redundanz und Erkennungsstrategie
- Anwendungstransparenz¹

→ Konkrete **Redundanztechnik**

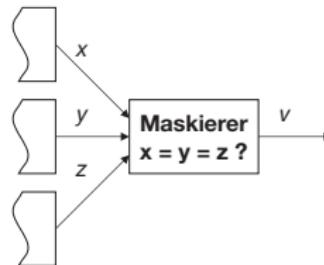
¹ Funktionelle und zeitliche Redundanz lassen sich in der Praxis nur fallspezifisch implementieren und stehen daher außerhalb des Veranstaltungskontextes.





Fehlererkennung – Grundlagen

Relativtest

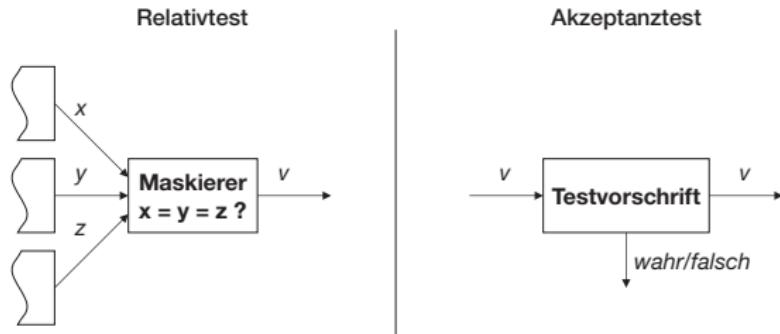


Akzeptanztest



⚠ Zwei Testverfahren zur Fehlererkennung (vgl. [3, S.78 ff])



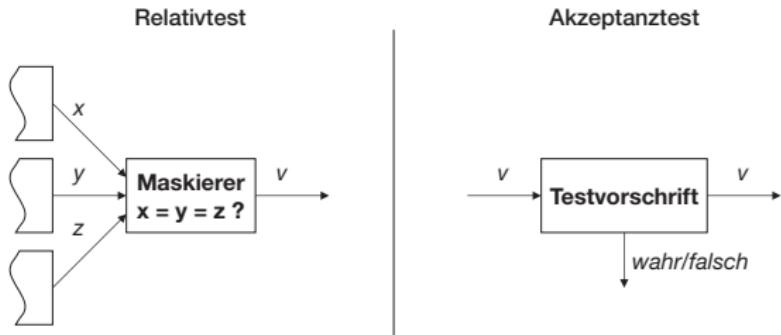


⚠ Zwei Testverfahren zur Fehlererkennung (vgl. [3, S.78 ff])

1 Relativtest (engl. *comparison test*) (auch *Vergleichstest*)

- Ist-Ist-Vergleich auf Übereinstimmung \leadsto anwendungsunabhängig
- Erfordert mehrere **Vergleichsobjekte**
- **Mehrheitsentscheider** (engl. *voter*) (auch Maskierer)
- ⚠ Ausschließlich bei struktureller Redundanz anwendbar





⚠ Zwei Testverfahren zur Fehlererkennung (vgl. [3, S.78 ff])

1 Relativtest (engl. *comparison test*) (auch *Vergleichstest*)

- Ist-Ist-Vergleich auf Übereinstimmung \leadsto anwendungsunabhängig
- Erfordert mehrere **Vergleichsobjekte**
→ **Mehrheitsentscheider** (engl. *voter*) (auch Maskierer)
- ⚠ Ausschließlich bei struktureller Redundanz anwendbar

2 Akzeptanztest (engl. *acceptance test*) (auch *Absoluttest*)

- Soll-Ist-Vergleich auf Konsistenzbedingung \leadsto anwendungsabhängig
- Ein **Testobjekt genügt**
- ⚠ Vollständigkeit der Testbedingung ist das Problem



1 Grundlagen

- Arten von Redundanz
- Einsatz von Redundanz

2 Strukturelle Redundanz

- Replikation
- Fehlerhypothese
- Voraussetzungen
- Nutzen
- Kritische Bruchstellen

3 Umsetzungsalternativen und Beispiele

- Hardwarebasierte Replikation
- Softwarebasierte Replikation

4 Diversität





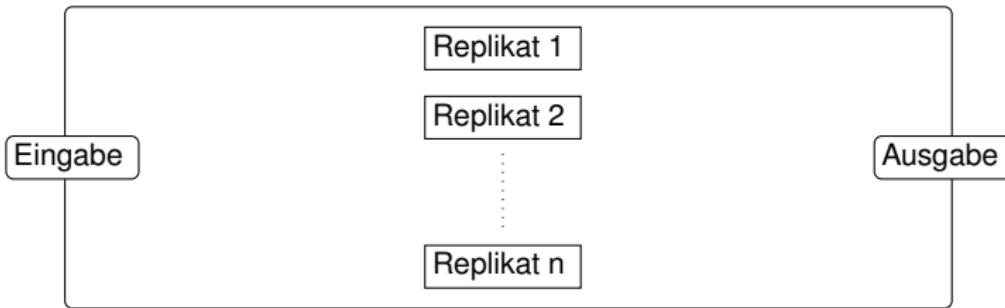
Replikation ist der koordinierte Einsatz struktureller Redundanz





Replikation ist der koordinierte Einsatz struktureller Redundanz

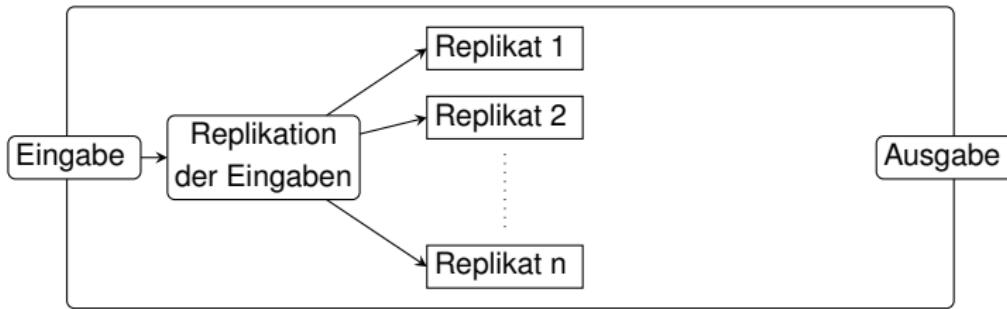
- Aufbau eines **Replikationsbereichs** (engl. *Sphere of Replication, SoR*) [5]
 - Sie maskiert transparent Fehler in einzelnen **Replikaten**





Replikation ist der koordinierte Einsatz struktureller Redundanz

- Aufbau eines **Replikationsbereichs** (engl. *Sphere of Replication, SoR*) [5]
 - Sie maskiert transparent Fehler in einzelnen **Replikaten**



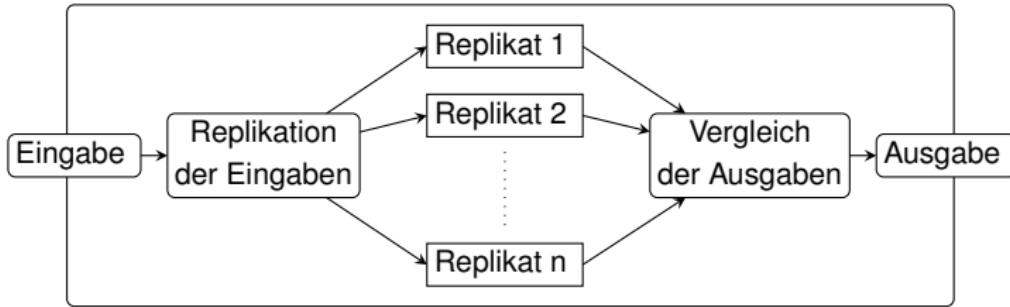
- Eingaben werden **repliziert** und auf die Replikate verteilt

Replikation



Replikation ist der koordinierte Einsatz struktureller Redundanz

- Aufbau eines **Replikationsbereichs** (engl. *Sphere of Replication, SoR*) [5]
 - Sie maskiert transparent Fehler in einzelnen **Replikaten**



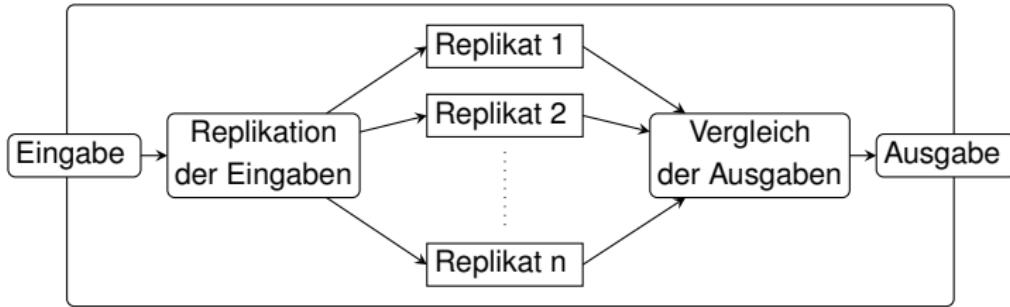
- Eingaben werden **repliziert** und auf die Replikate verteilt
- In einem Ausgangsvergleich werden die **Ausgaben abgestimmt**





Replikation ist der koordinierte Einsatz struktureller Redundanz

- Aufbau eines **Replikationsbereichs** (engl. *Sphere of Replication, SoR*) [5]
 - Sie maskiert transparent Fehler in einzelnen **Replikaten**



- Eingaben werden **repliziert** und auf die Replikate verteilt
- In einem Ausgangsvergleich werden die **Ausgaben abgestimmt**



Offene Fragestellungen:

- Wie viele **Replikate** benötigt man, um das zuverlässig tun zu können?
- Welche **Voraussetzungen** müssen für eine erfolgreiche Replikation gelten?



Wie viele Replikate braucht man?

Allgemeiner Fall mit unabhängigen Replikaten (Knoten)

- Zahl benötigter Replikate hängt von der Art des Fehlverhaltens ab [4]
 - Annahme: von n Replikaten sind in folgender Weise f fehlerhaft



Wie viele Replikate braucht man?

Allgemeiner Fall mit unabhängigen Replikaten (Knoten)

- Zahl benötigter Replikate hängt von der Art des Fehlverhaltens ab [4]
 - Annahme: von n Replikaten sind in folgender Weise f fehlerhaft
 - „fail-silent“
 - Ein Replikat erzeugt korrekt oder gar keine Antworten
 - Das Fehlerverhalten führt zum Stillstand
 - Einfachster Fehlermodus
 - Der Ausfall wird von den anderen Replikaten als solcher erkannt



Wie viele Replikate braucht man?

Allgemeiner Fall mit unabhängigen Replikaten (Knoten)

- Zahl benötigter Replikate hängt von der Art des Fehlverhaltens ab [4]
 - Annahme: von n Replikaten sind in folgender Weise f fehlerhaft
 - „fail-silent“
 - Anzahl der Replikate $n = f + 1$
 - Ein Replikat erzeugt korrekt oder gar keine Antworten
 - Das Fehlerverhalten führt zum Stillstand
 - Einfachster Fehlermodus
 - Der Ausfall wird von den anderen Replikaten als solcher erkannt

Wie viele Replikate braucht man?

Allgemeiner Fall mit unabhängigen Replikaten (Knoten)

- Zahl benötigter Replikate hängt von der Art des Fehlverhaltens ab [4]
 - Annahme: von n Replikaten sind in folgender Weise **f fehlerhaft**
 - „fail-silent“
 - Ein Replikat erzeugt korrekt oder gar keine Antworten
 - Das Fehlerverhalten führt zum Stillstand
 - Einfachster Fehlermodus
 - Der Ausfall wird von den anderen Replikaten als solcher erkannt
 - „fail-consistent“
 - Ein Replikat kann auch fehlerhafte Antworten erzeugen
 - Alle anderen Replikate sehen konsistent dasselbe Fehlverhalten

Wie viele Replikate braucht man?

Allgemeiner Fall mit unabhängigen Replikaten (Knoten)

- Zahl benötigter Replikate hängt von der Art des Fehlverhaltens ab [4]
 - Annahme: von n Replikaten sind in folgender Weise **f fehlerhaft**
 - „fail-silent“
 - Ein Replikat erzeugt korrekt oder gar keine Antworten
 - Das Fehlerverhalten führt zum Stillstand
 - Einfachster Fehlermodus
 - Der Ausfall wird von den anderen Replikaten als solcher erkannt
 - „fail-consistent“
 - Ein Replikat kann auch fehlerhafte Antworten erzeugen
 - Alle anderen Replikate sehen konsistent dasselbe Fehlverhalten

→ Anzahl der Replikate $n = f + 1$

→ Anzahl der Replikate $n = 2f + 1$



Wie viele Replikate braucht man?

Allgemeiner Fall mit unabhängigen Replikaten (Knoten)

- Zahl benötigter Replikate hängt von der Art des Fehlverhaltens ab [4]
 - Annahme: von n Replikaten sind in folgender Weise **f fehlerhaft**

„fail-silent“

→ Anzahl der Replikate $n = f + 1$

- Ein Replikat erzeugt **korrekt oder gar keine Antworten**
- Das Fehlerverhalten führt zum Stillstand
- **Einfachster Fehlermodus**
 - Der Ausfall wird von den anderen Replikaten als solcher erkannt

„fail-consistent“

→ Anzahl der Replikate $n = 2f + 1$

- Ein Replikat kann auch **fehlerhafte Antworten** erzeugen
- Alle anderen Replikate sehen **konsistent dasselbe Fehlverhalten**

„malicious“

- „**bösartige**“, fehlerhafte Replikate erzeugen **verschiedene Antworten**
 - **Keine konsistente Sicht** auf das Fehlverhalten
 - Typischerweise verursacht durch Komm'system (Nachrichtenausfall!)
- Synonym: **byzantinische Fehler** (engl. *byzantine failures*)



Wie viele Replikate braucht man?

Allgemeiner Fall mit unabhängigen Replikaten (Knoten)

- Zahl benötigter Replikate hängt von der Art des Fehlverhaltens ab [4]
 - Annahme: von n Replikaten sind in folgender Weise **f fehlerhaft**

„fail-silent“

→ Anzahl der Replikate $n = f + 1$

- Ein Replikat erzeugt **korrekt oder gar keine Antworten**
- Das Fehlerverhalten führt zum Stillstand
- **Einfachster Fehlermodus**
 - Der Ausfall wird von den anderen Replikaten als solcher erkannt

„fail-consistent“

→ Anzahl der Replikate $n = 2f + 1$

- Ein Replikat kann auch **fehlerhafte Antworten** erzeugen
- Alle anderen Replikate sehen **konsistent dasselbe Fehlverhalten**

„malicious“

→ Anzahl der Replikate $n = 3f + 1$

- „**bösartige**“, fehlerhafte Replikate erzeugen **verschiedene Antworten**
 - **Keine konsistente Sicht** auf das Fehlverhalten
 - Typischerweise verursacht durch Komm'system (Nachrichtenausfall!)
- Synonym: **byzantinische Fehler** (engl. *byzantine failures*)





In der Praxis betrachtet man für Echtzeitsysteme Replikate, die:

- Einen Fehler tolerieren können
- Sich „fail-silent“ oder zumindest „fail-consistent“ verhalten
- Unabhängig voneinander ausfallen (vgl. Folie 13 f)
- Sich Replikdeterministisch verhalten (vgl. Folie 15 ff)



In der Praxis betrachtet man für Echtzeitsysteme Replikate, die:

- Einen Fehler tolerieren können
- Sich „fail-silent“ oder zumindest „fail-consistent“ verhalten
- **Unabhängig** voneinander ausfallen (vgl. Folie 13 f)
- Sich **Replikdeterministisch** verhalten (vgl. Folie 15 ff)



Byzantinische Fehlertoleranz wird üblicherweise nicht angestrebt

- Grund ist der **enorme Aufwand**, der damit verbunden ist
- $3f + 1$ Replikate um f Fehler zu tolerieren
- Getrennte Kommunikationswege zwischen allen Replikaten
 - Hoher Hardwareaufwand für Replikate und Verkablung
 - **hohe Kosten, Gewicht, Energieverbrauch**
- Erkennung fehlerhafter Replikate erfordert aufwendige Kommunikation
 - $f + 1$ Kommunikationsrunden für $3f + 1$ Replikate und f Fehler
 - Je Runde schickt jedes Replikat eine Nachricht an alle anderen Replikate
 - Für Echtzeitsysteme ein **nicht tolerierbarer zeitlicher Aufwand**





- Replikate müssen **unabhängig** voneinander ausfallen
 - **Gleichtaktfehler** (engl. *common mode failures*) sind zu vermeiden
 - Sie führen zum **gleichzeitigen Ausfall mehrerer Replikate**
 - ⚠ Eine Fehlermaskierung ist in diesem Fall nicht mehr möglich
 - **Quellen für Gleichtaktfehler**
 - **Permanente Fehler** in den Komponenten (vgl. Ariane 5 Kapitel II/16 ff)
 - **Übergreifen eines Fehlers** auf andere Replikate (Fehlerausbreitung)





- Replikate müssen **unabhängig** voneinander ausfallen
 - **Gleichtaktfehler** (engl. *common mode failures*) sind zu vermeiden
 - Sie führen zum **gleichzeitigen Ausfall** mehrerer Replikate
 - ⚠ Eine Fehlermaskierung ist in diesem Fall nicht mehr möglich
 - **Quellen für Gleichtaktfehler**
 - **Permanente Fehler** in den Komponenten (vgl. Ariane 5 Kapitel II/16 ff)
 - **Übergreifen eines Fehlers** auf andere Replikate (Fehlerausbreitung)



Einzelne Replikate sind **gegeneinander abzuschotten**

- **Räumliche Isolation** des internen Zustands
 - Dieser darf nicht durch andere Replikate korrumptiert werden
 - Ein verfälschter Zeiger hat großes Schadenspotential
- **Zeitliche Isolation** anderer Aktivitätsträger
 - Eine Monopolisierung der Ausführungseinheiten ist zu verhindern
 - Ein Amok laufender Faden könnte in einer Schleife „festhängen“
 - Selbiges gilt für alle gemeinsamen Betriebsmittel



Lose Kopplung unterstützt Isolation



Ziel sind **lose gekoppelte Replikate**

- Minimierung des Koordinations- und Kommunikationsaufwands
 - Je weniger sich einzelne Replikate abstimmen müssen, umso besser
- Fehlerausbreitung wird auf diese Weise effektiv vermieden



Lose Kopplung unterstützt Isolation



Ziel sind **lose gekoppelte Replikate**

- Minimierung des Koordinations- und Kommunikationsaufwands
 - Je weniger sich einzelne Replikate abstimmen müssen, umso besser
- Fehlerausbreitung wird auf diese Weise effektiv vermieden

■ Unterstützung durch eine **statische, zyklische Ablaufstruktur**

1 Eingaben lesen

- Der Zustand des kontrollierten Objekts wird erfasst

2 Berechnungen durchführen

- Der neue Zustand wird aus dem alten Zustand und den Eingaben berechnet

3 Ausgaben schreiben

- Die Stellwerte werden an die Akteure ausgegeben





Ziel sind **lose gekoppelte Replikate**

- Minimierung des Koordinations- und Kommunikationsaufwands
 - Je weniger sich einzelne Replikate abstimmen müssen, umso besser
- Fehlerausbreitung wird auf diese Weise effektiv vermieden

■ Unterstützung durch eine **statische, zyklische Ablaufstruktur**

1 Eingaben lesen

- Der Zustand des kontrollierten Objekts wird erfasst

2 Berechnungen durchführen

- Der neue Zustand wird aus dem alten Zustand und den Eingaben berechnet

3 Ausgaben schreiben

- Die Stellwerte werden an die Akteure ausgegeben

■ Lediglich die Schritte 1 und 3 erfordern eine Abstimmung der Replikate

- Austausch von Nachrichten zwischen den Replikaten, um durch ein Einigungsprotokoll einen Konsens über die Eingaben/Ausgaben zu erzielen

■ Die Berechnung wird von jedem Replikat in „Eigenregie“ durchgeführt

- Ermöglicht einen unterbrechungsfreien Durchlauf (engl. *run-to-completion*)



Korrekt arbeitende Replikate müssen identische Ergebnisse liefern.



Replikate sind **replikdeterministisch** (engl. *replica determinate*), wenn:

- Ihr von außen beobachtbarer Zustand identisch ist, und ...
- Sie zum ungefähr gleichen Zeitpunkt identische Ausgaben erzeugen
 - Sie müssen innerhalb eines Zeitintervalls der Länge d erzeugt werden
 - Im Bezug auf einen gemeinsamen Referenzzeitgeber

Korrekt arbeitende Replikate müssen identische Ergebnisse liefern.



Replikate sind **replikdeterministisch** (engl. *replica determinate*), wenn:

- Ihr von außen beobachtbarer Zustand identisch ist, und ...
- Sie zum ungefähr gleichen Zeitpunkt identische Ausgaben erzeugen
 - Sie müssen innerhalb eines Zeitintervalls der Länge d erzeugt werden
 - Im Bezug auf einen gemeinsamen Referenzzeitgeber

■ Warum ist Replikdeterminismus wichtig?

- Replikdeterminismus ist eine **Grundvoraussetzung** für aktive Redundanz!



☞ Replikate sind **replikdeterministisch** (engl. *replica determinate*), wenn:

- Ihr von außen beobachtbarer Zustand identisch ist, und ...
- Sie zum ungefähr gleichen Zeitpunkt identische Ausgaben erzeugen
 - Sie müssen innerhalb eines Zeitintervalls der Länge d erzeugt werden
 - Im Bezug auf einen gemeinsamen Referenzzeitgeber

■ Warum ist Replikdeterminismus wichtig?

- Replikdeterminismus ist eine **Grundvoraussetzung** für aktive Redundanz!
- Korrekte Replikate könnten sonst **unterschiedliche Ergebnisse** liefern
 - Ein Mehrheitsentscheid ist in diesem Fall nicht mehr möglich
- In den Replikaten kann **der interne Zustand divergieren**
 - Unterschiedliche Ergebnisse sind die logische Folge
 - Ein im Hintergrund laufendes Replikat kann im Fehlerfall nicht übernehmen
- Außerdem wird die **Testbarkeit** verbessert
 - Schließlich kann man präzise Aussagen treffen, wann welche Ergebnisse von den einzelnen Replikaten geliefert werden müssten



- Abweichende Eingaben bei verschiedenen Replikaten
 - Digitalisierungsfehler, z. B. bei der Analog-Digital-Wandlung
 - Temperatur- oder Drucksensoren liefern zunächst eine Spannung
 - Diese Spannungen werden in einen diskreten Zahlenwert überführt
 - Abbildungen kontinuierlicher auf diskrete Werte sind fehlerbehaftet
 - Dies betrifft auch die **Diskretisierung der physikalischen Zeit**
 - unterschiedliche Reihenfolge beobachteter Ereignisse

- Abweichende Eingaben bei verschiedenen Replikaten
 - Digitalisierungsfehler, z. B. bei der Analog-Digital-Wandlung
 - Temperatur- oder Drucksensoren liefern zunächst eine Spannung
 - Diese Spannungen werden in einen diskreten Zahlenwert überführt
 - Abbildungen kontinuierlicher auf diskrete Werte sind fehlerbehaftet
 - Dies betrifft auch die Diskretisierung der physikalischen Zeit
 - unterschiedliche Reihenfolge beobachteter Ereignisse
- Unterschiedlicher zeitlicher Fortschritt der einzelnen Replikate
 - Oszillatoren verschiedener Replikate sind nie exakt gleich
 - Vor allem der Zugriff auf die lokale Uhr ist problematisch
 - u. U. werden lokale Auszeiten (engl. *time-outs*) deshalb gerissen

- Abweichende Eingaben bei verschiedenen Replikaten
 - Digitalisierungsfehler, z. B. bei der Analog-Digital-Wandlung
 - Temperatur- oder Drucksensoren liefern zunächst eine Spannung
 - Diese Spannungen werden in einen diskreten Zahlenwert überführt
 - Abbildungen kontinuierlicher auf diskrete Werte sind fehlerbehaftet
 - Dies betrifft auch die Diskretisierung der physikalischen Zeit
 - unterschiedliche Reihenfolge beobachteter Ereignisse
- Unterschiedlicher zeitlicher Fortschritt der einzelnen Replikate
 - Oszillatoren verschiedener Replikate sind nie exakt gleich
 - Vor allem der Zugriff auf die lokale Uhr ist problematisch
 - u. U. werden lokale Auszeiten (engl. *time-outs*) deshalb gerissen
- Präemptive Ablaufplanung ereignisgesteuerter Arbeitsaufträge
 - Diese bearbeiten u. U. unterschiedliche interne Zustände
 - Die evtl. aus Wettkaufsituation (engl. *data races*) erwachsen sind

- Abweichende Eingaben bei verschiedenen Replikaten
 - Digitalisierungsfehler, z. B. bei der Analog-Digital-Wandlung
 - Temperatur- oder Drucksensoren liefern zunächst eine Spannung
 - Diese Spannungen werden in einen diskreten Zahlenwert überführt
 - Abbildungen kontinuierlicher auf diskrete Werte sind fehlerbehaftet
 - Dies betrifft auch die Diskretisierung der physikalischen Zeit
 - unterschiedliche Reihenfolge beobachteter Ereignisse
- Unterschiedlicher zeitlicher Fortschritt der einzelnen Replikate
 - Oszillatoren verschiedener Replikate sind nie exakt gleich
 - Vor allem der Zugriff auf die lokale Uhr ist problematisch
 - u. U. werden lokale Auszeiten (engl. *time-outs*) deshalb gerissen
- Präemptive Ablaufplanung ereignisgesteuerter Arbeitsaufträge
 - Diese bearbeiten u. U. unterschiedliche interne Zustände
 - Die evtl. aus Wettsituations (engl. *data races*) erwachsen sind
- Nicht-deterministische Konstrukte der Programmiersprache
 - z. B. die SELECT-Anweisung der Programmiersprache Ada



Wie stellt man Replikdeterminismus sicher?

■ Globale diskrete Zeitbasis

- Ermöglicht eine **globale zeitliche Ordnung** relevanter Ereignisse
 - Ohne dass sich die Replikate hierfür explizit einigen müssen
- Es dürfen **keine lokale Auszeiten** verwendet werden
 - Betrifft die Anwendung, Kommunikations- und Betriebssystem



Wie stellt man Replikdeterminismus sicher?

■ Globale diskrete Zeitbasis

- Ermöglicht eine **globale zeitliche Ordnung** relevanter Ereignisse
 - Ohne dass sich die Replikate hierfür explizit einigen müssen
- Es dürfen **keine lokale Auszeiten** verwendet werden
 - Betrifft die Anwendung, Kommunikations- und Betriebssystem

■ Einigung über die Eingabewerte

- Die Replikate führen hierzu ein Einigungsprotokoll durch
 - Konsistente Sicht bzgl. **Wert und Zeitpunkt** der Eingabe
 - Grundlage für die globale zeitliche Ordnung aller Ereignisse



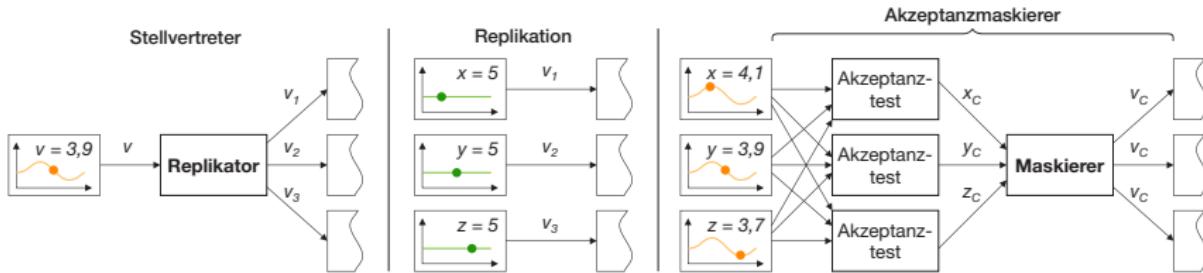
- **Globale diskrete Zeitbasis**
 - Ermöglicht eine **globale zeitliche Ordnung** relevanter Ereignisse
 - Ohne dass sich die Replikate hierfür explizit einigen müssen
 - Es dürfen **keine lokale Auszeiten** verwendet werden
 - Betrifft die Anwendung, Kommunikations- und Betriebssystem
- **Einigung über die Eingabewerte**
 - Die Replikate führen hierzu ein Einigungsprotokoll durch
 - Konsistente Sicht bzgl. **Wert und Zeitpunkt** der Eingabe
 - Grundlage für die globale zeitliche Ordnung aller Ereignisse
- **Statische Kontrollstruktur**
 - Kontrollentscheidungen sind **unabhängig von Eingabedaten**
 - Ermöglicht außerdem eine statische Analyse dieser Entscheidungen
 - Programmunterbrechungen sind mit größter Vorsicht einzusetzen

- **Globale diskrete Zeitbasis**
 - Ermöglicht eine **globale zeitliche Ordnung** relevanter Ereignisse
 - Ohne dass sich die Replikate hierfür explizit einigen müssen
 - Es dürfen **keine lokale Auszeiten** verwendet werden
 - Betrifft die Anwendung, Kommunikations- und Betriebssystem
- **Einigung über die Eingabewerte**
 - Die Replikate führen hierzu ein Einigungsprotokoll durch
 - Konsistente Sicht bzgl. **Wert und Zeitpunkt** der Eingabe
 - Grundlage für die globale zeitliche Ordnung aller Ereignisse
- **Statische Kontrollstruktur**
 - Kontrollentscheidungen sind **unabhängig von Eingabedaten**
 - Ermöglicht außerdem eine statische Analyse dieser Entscheidungen
 - Programmunterbrechungen sind mit größter Vorsicht einzusetzen
- **Deterministische Algorithmen**
 - Keine randomisierten Verfahren, nur stabile Sortierverfahren, ...





Replikation der Eingänge



Deterministische, seiteneffektfreie Eingänge

- Mehrfaches Auslesen (Replikation) des Wertes möglich
→ Zustandswerte, welche im Betrachtungszeitraum ihre Gültigkeit bewahren

Indeterministische Eingänge

⚠ Mehrfaches Auslesen führt zu unterschiedlichen Werten

- Einsatz eines Stellvertreters
 - Liest den Wert einmal und dupliziert diesen → Keine Redundanz!
- Alternative: Akzeptanzmaskierer
 - Kombination aus Akzeptanz- und Relativtest
 - Anwendungsspezifische Übereinstimmungsbedingung





- Erhöht sich durch Replikation in jedem Fall die Zuverlässigkeit?
 - Anders formuliert: $R_{tmr} > R_r$?
 - R_{tmr} – Zuverlässigkeit des TMR-Verbunds, R_r des einzelnen Replikats

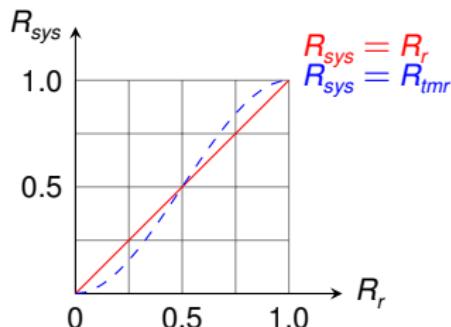


- ☞ Erhöht sich durch Replikation in jedem Fall die Zuverlässigkeit?
 - Anders formuliert: $R_{tmr} > R_r$?
 - R_{tmr} – Zuverlässigkeit des TMR-Verbunds, R_r des einzelnen Replikats
 - Die Replikation arbeitet korrekt, solange ...
 - Der Mehrheitsentscheid korrekt funktioniert $\leadsto R_v$
 - Zwei Replikate korrekt funktionieren $\leadsto R_{2/3} = R_r^3 + 3R_r^2(1 - R_r)$
 - Alle drei Replikate arbeiten korrekt oder ...
 - Ein Replikat fällt aus, hierfür gibt es drei Möglichkeiten
- Insgesamt $R_{tmr} = R_v(R_r^3 + 3R_r^2(1 - R_r))$

Zuverlässigkeitsgewinn durch Replikation

Hilft viel grundsätzlich viel?

- Erhöht sich durch Replikation in jedem Fall die Zuverlässigkeit?
 - Anders formuliert: $R_{tmr} > R_r$
 - R_{tmr} – Zuverlässigkeit des TMR-Verbunds, R_r des einzelnen Replikats
 - Die Replikation arbeitet korrekt, solange ...
 - Der Mehrheitsentscheid korrekt funktioniert $\leadsto R_v$
 - Zwei Replikate korrekt funktionieren $\leadsto R_{2/3} = R_r^3 + 3R_r^2(1 - R_r)$
 - Alle drei Replikate arbeiten korrekt oder ...
 - Ein Replikat fällt aus, hierfür gibt es drei Möglichkeiten
- Insgesamt $R_{tmr} = R_v(R_r^3 + 3R_r^2(1 - R_r))$



- Annahme: Perfekter Voter $R_v = 1$
- ⚠ TMR ist nur sinnvoll falls $R_r > 0.5$
- ⚠ Praxis: Voter sollte zuverlässig sein
 - Größenordnung $R_v > 0.9$





Kritische Bruchstellen (engl. *single points of failure*)

- Führen zu einem beobachtbaren Fehlerfall **innerhalb der Fehlerhypothese**
 - **Kompromittieren** die fehlertolerierende Eigenschaft des Redundanzbereichs
- Im Beispiel auf Folie 10 sind dies **Eingabe und Ausgabe**





Kritische Bruchstellen (engl. *single points of failure*)

- Führen zu einem beobachtbaren Fehlerfall **innerhalb der Fehlerhypothese**
- **Kompromittieren** die fehlertolerierende Eigenschaft des Redundanzbereichs
- Im Beispiel auf Folie 10 sind dies **Eingabe und Ausgabe**



Lösungsmöglichkeiten

- Bestimme Eingabedaten aus **mehreren Sensoren**
 - Dies erfordert eine **Einigung der Replikate** über den Eingabewert, allen muss exakt derselbe Wert zugestellt werden
 - Anwendung funktionaler Redundanz → **Sensorfusion** (engl. *sensor fusion*)
- **Replizierte den Ausgangsvergleich**
 - Erneuter Mehrheitsentscheid über die Ergebnisse des replizierten Vergleichs
 - Das ist wieder eine kritische Bruchstelle, aber **die Fehlerwahrscheinlichkeit sind insgesamt geringer, verschwinden tut sie nie ...**
- **Robuste Implementierung des Ausgangsvergleichs**
 - Zusätzliche Absicherung des Ergebnisses
 - Durchführung des Mehrheitsentscheids durch den **Aktor**



1 Grundlagen

- Arten von Redundanz
- Einsatz von Redundanz

2 Strukturelle Redundanz

- Replikation
- Fehlerhypothese
- Voraussetzungen
- Nutzen
- Kritische Bruchstellen

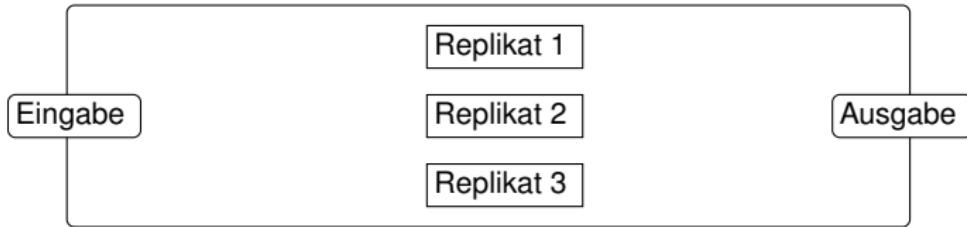
3 Umsetzungsalternativen und Beispiele

- Hardwarebasierte Replikation
- Softwarebasierte Replikation

4 Diversität



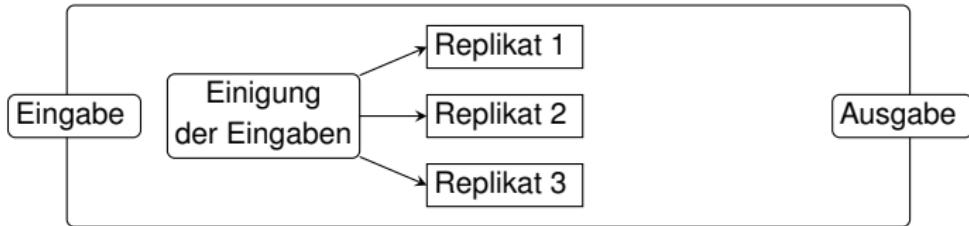
Hardware Triple Modular Redundancy (TMR)



- Üblicherweise dreifache Replikation kompletter Rechenknoten
 - Räumlich redundante Systeme
 - Weitgehende räumliche und zeitliche Isolation

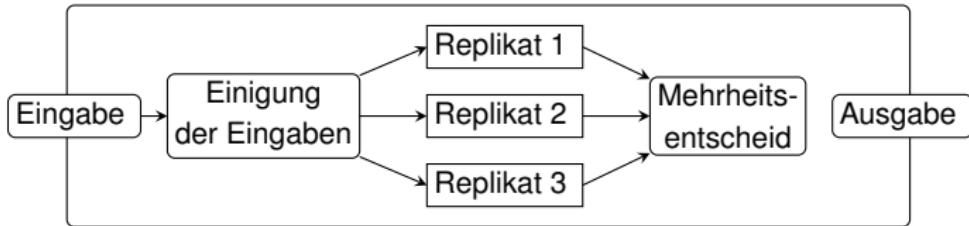


Hardware Triple Modular Redundancy (TMR)



- Üblicherweise **dreifache Replikation** kompletter Rechenknoten
 - **Räumlich redundante** Systeme
→ Weitgehende räumliche und zeitliche Isolation
- **Abstimmung der Eingabewerte** zwischen den Replikaten
 - Die Replikate verfügen über eine gemeinsame globale Zeitbasis
 - Das Kommunikationssystem verhindert die Steuerfehlerausbreitung
→ Vollständige zeitliche Isolation [6, Kapitel 8] und Replikdeterminismus

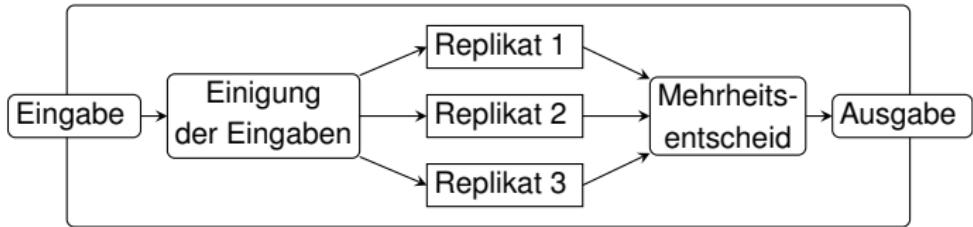
Hardware Triple Modular Redundancy (TMR)



- Üblicherweise **dreifache Replikation** kompletter Rechenknoten
 - **Räumlich redundante** Systeme
→ Weitgehende räumliche und zeitliche Isolation
- **Abstimmung** der **Eingabewerte** zwischen den Replikaten
 - Die Replikate verfügen über eine gemeinsame globale Zeitbasis
 - Das Kommunikationssystem verhindert die Steuerfehlerausbreitung
→ Vollständige zeitliche Isolation [6, Kapitel 8] und Replikdeterminismus
- **Mehrheitsentscheid** stimmt Ausgabewerte ab
 - Vereinigung von **Fehlermaskierung** und -erkennung



Hardware Triple Modular Redundancy (TMR)



- Üblicherweise **dreifache Replikation** kompletter Rechenknoten
 - **Räumlich redundante** Systeme
→ Weitgehende räumliche und zeitliche Isolation
- **Abstimmung** der **Eingabewerte** zwischen den Replikaten
 - Die Replikate verfügen über eine gemeinsame globale Zeitbasis
 - Das Kommunikationssystem verhindert die Steuerfehlerausbreitung
→ Vollständige zeitliche Isolation [6, Kapitel 8] und Replikdeterminismus
- **Mehrheitsentscheid** stimmt Ausgabewerte ab
 - Vereinigung von **Fehlermaskierung** und -erkennung



Hot standby: Rechensysteme arbeiten **simultan**

- Sie verarbeiten gleichzeitig dieselben Eingaben
- Ihr Zustand ist **jederzeit konsistent**
 - **nahtloser Ersatz** für ausgefallene Replikate



Hot standby: Rechensysteme arbeiten **simultan**

- Sie verarbeiten gleichzeitig dieselben Eingaben
- Ihr Zustand ist **jederzeit konsistent**
 - **nahtloser Ersatz** für ausgefallene Replikate

Warm standby: Unterscheidung von **Primär- und Sekundärsystem**

- Sekundärsystem läuft im **Hintergrund**
 - **Regelmäßige Zustandssicherung** (engl. *checkpoint*) des Primärsystems
 - Rückkehr zur letzten Sicherung im Fehlerfall (engl. *recovery*)
- Primär- und Sekundärsystem sind zeitweise inkonsistent
 - Höherer Aufwand im Falle der Fehlererholung

Hot standby: Rechensysteme arbeiten **simultan**

- Sie verarbeiten gleichzeitig dieselben Eingaben
- Ihr Zustand ist **jederzeit konsistent**
 - **nahtloser Ersatz** für ausgefallene Replikate

Warm standby: Unterscheidung von **Primär- und Sekundärsystem**

- Sekundärsystem läuft im **Hintergrund**
 - **Regelmäßige Zustandssicherung** (engl. *checkpoint*) des Primärsystems
 - Rückkehr zur letzten Sicherung im Fehlerfall (engl. *recovery*)
- Primär- und Sekundärsystem sind zeitweise inkonsistent
 - Höherer Aufwand im Falle der Fehlererholung

Cold standby: Sekundärsystem startet im Fehlerfall

- **Unregelmäßige und eher seltene Zustandsicherung**
 - Potentiell **großer Abstand** der Redundanzen
 - Potentiell **langwierige** Fehlererholung



Hot standby: Rechensysteme arbeiten **simultan**

- Sie verarbeiten gleichzeitig dieselben Eingaben
- Ihr Zustand ist **jederzeit konsistent**
 - **nahtloser Ersatz** für ausgefallene Replikate

Warm standby: Unterscheidung von **Primär- und Sekundärsystem**

- Sekundärsystem läuft im **Hintergrund**
 - **Regelmäßige Zustandssicherung** (engl. *checkpoint*) des Primärsystems
 - Rückkehr zur letzten Sicherung im Fehlerfall (engl. *recovery*)
- Primär- und Sekundärsystem sind zeitweise inkonsistent
 - Höherer Aufwand im Falle der Fehlererholung

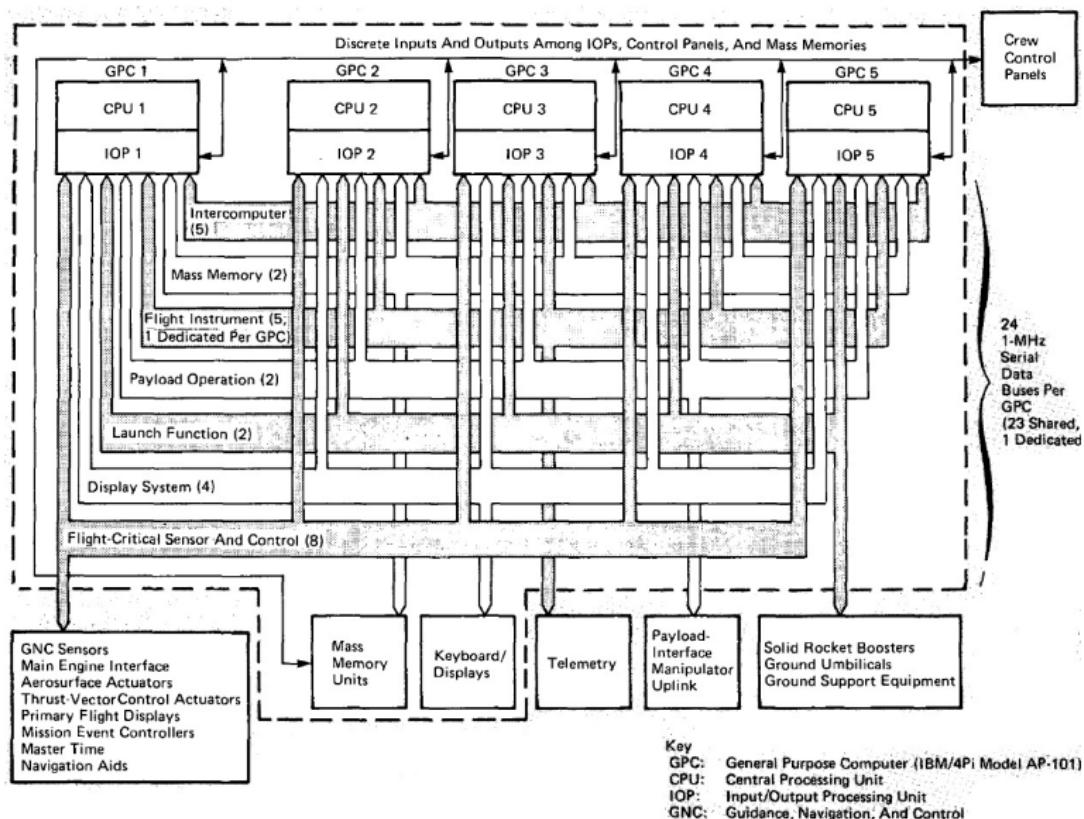
Cold standby: Sekundärsystem startet im Fehlerfall

- **Unregelmäßige und eher seltene Zustandsicherung**
 - Potentiell **großer Abstand** der Redundanzen
 - Potentiell **langwierige** Fehlererholung

 **Fokus:** Replizierte Systeme im „hot standby“-Betrieb



Beispiel: Steuerung des Space Shuttle [2]

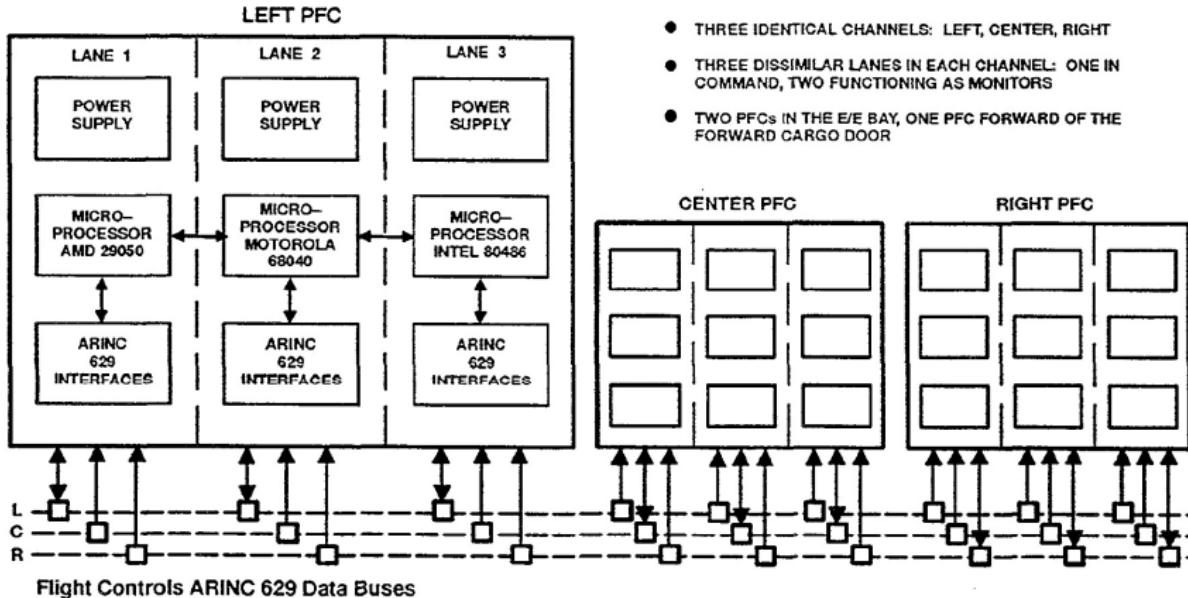


- Insgesamt **fünf redundante Rechensysteme** [1, Kapitel 4.4]
 - Ursprünglich gewünschte: fail-operational/fail-operational/fail-safe
 - Verlust eines Kontrollrechners ändert nichts an der Funktionsfähigkeit
 - Das Gesamtsystem behält immer noch die Eigenschaft **fail-operational**
 - Das war jedoch **zu teuer** → Reduktion auf vier Systeme
 - Dies bedeutet **fail-operational/fail-safe**
 - Das fünfte System war aber bereits überall eingeplant
 - Es wurde zu einem Backup-System „degradiert“ → „cold standby“

- Insgesamt **fünf redundante Rechensysteme** [1, Kapitel 4.4]
 - Ursprünglich gewünschte: fail-operational/fail-operational/fail-safe
 - Verlust eines Kontrollrechners ändert nichts an der Funktionsfähigkeit
 - Das Gesamtsystem behält immer noch die Eigenschaft **fail-operational**
 - Das war jedoch **zu teuer** → Reduktion auf vier Systeme
 - Dies bedeutet **fail-operational/fail-safe**
 - Das fünfte System war aber bereits überall eingeplant
 - Es wurde zu einem Backup-System „degradiert“ → „**cold standby**“
- unterschiedliche Konfiguration der Rechner je nach Missionsabschnitt
 - TMR nur im **Steigflug** bzw. **Sinkflug**
 - **Drei Systeme** laufen simultan im „**hot standby**“-Betrieb
 - Das **vierte System** läuft im „**warm standby**“
 - Das **fünfte System** ist das Backup → „**cold standby**“
 - Während des Shuttle in der **Umlaufbahn** ist, wird die Redundanz reduziert
 - **Zwei System** laufen weiterhin simultan
 - Das **dritte System** übernimmt Lebenserhaltungssysteme, ...
 - Das **vierte und fünfte Systeme** sind Backup → „**cold standby**“



Beispiel: Steuerung des Boeing 777 [7]

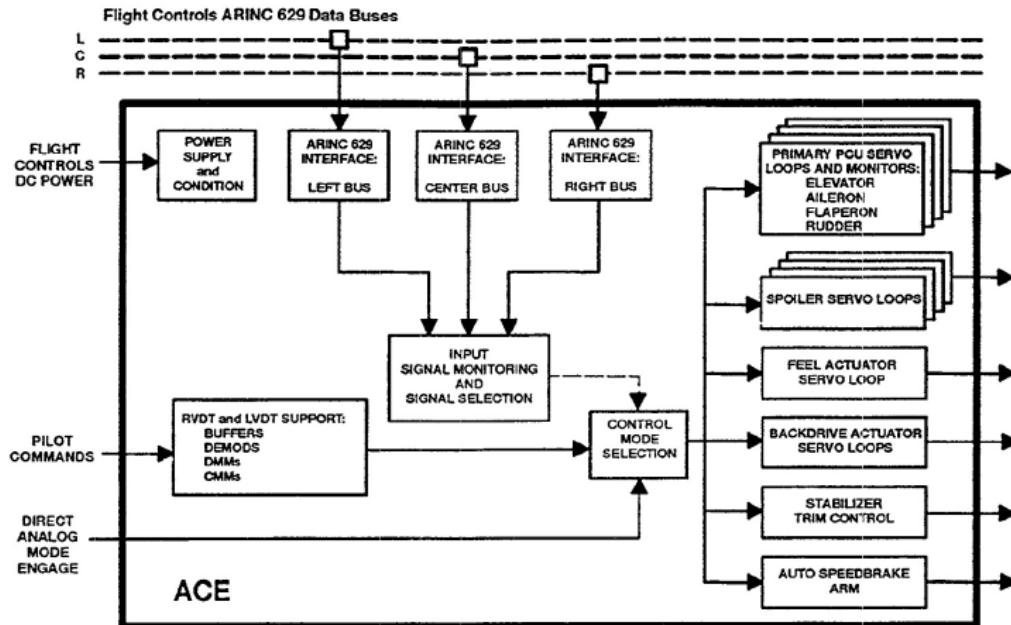


- THREE IDENTICAL CHANNELS: LEFT, CENTER, RIGHT
- THREE DISSIMILAR LANES IN EACH CHANNEL: ONE IN COMMAND, TWO FUNCTIONING AS MONITORS
- TWO PFCs IN THE E/E BAY, ONE PFC FORWARD OF THE FORWARD CARGO DOOR

- Drei identische redundante Kanäle: links, mitte, rechts
 - Bestehend aus jeweils drei diversitären redundanten Pfaden
- Räumliche Verteilung innerhalb des Flugzeugs
 - Minimierung der Auswirkungen z. B. von Blitzschlägen



Beispiel: Steuerung des Boeing 777 [7] (Forts.)



- Mehrheitsentscheid beim Aktor
 - ACE = actuator control electronics
 - Die Aktoren selbst sind ebenfalls redundant

- Jedes Replikat kontrolliert jeweils ein Ventil
 - Vorgehensweise und Schaltfunktion ist hochgradig problemspezifisch
 - Auch anwendbar auf elektronische Schaltkreise und Relais

- Jedes Replikat kontrolliert jeweils ein Ventil
 - Vorgehensweise und Schaltfunktion ist hochgradig problemspezifisch
 - Auch anwendbar auf elektronische Schaltkreise und Relais
- **Reihenschaltung** von Absperrventilen

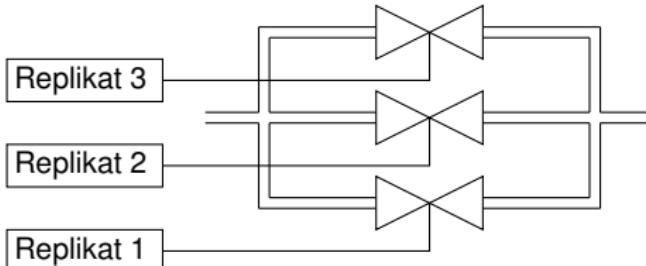


- Um den Fluss zu stoppen, genügt ein korrektes Replikat

- Jedes Replikat kontrolliert jeweils ein Ventil
 - Vorgehensweise und Schaltfunktion ist hochgradig problemspezifisch
 - Auch anwendbar auf elektronische Schaltkreise und Relais
- **Reihenschaltung** von Absperrventilen



- Um den Fluss zu stoppen, genügt ein korrektes Replikat
- **Parallelenschaltung** von Absperrventilen



- Um den Fluss zu ermöglichen, genügt ein korrektes Replikat



Vorteile

- Sehr hohe Zuverlässigkeit bei richtigem Einsatz



Vorteile

- Sehr hohe Zuverlässigkeit bei richtigem Einsatz

Nachteile

- Enorm hoher Hardwareaufwand
 - Ein Großteil der Hardwarekomponenten wird redundant ausgelegt
- Hiermit direkt verbunden sind
 - Hohe Kosten – viel Hardware kostet viel
 - Hohes Gewicht – viel Hardware wiegt viel
 - Hoher Energieverbrauch – viel Hardware benötigt viel Energie



Vorteile

- Sehr hohe Zuverlässigkeit bei richtigem Einsatz

Nachteile

- Enorm hoher Hardwareaufwand
 - Ein Großteil der Hardwarekomponenten wird redundant ausgelegt
- Hiermit direkt verbunden sind
 - Hohe Kosten – viel Hardware kostet viel
 - Hohes Gewicht – viel Hardware wiegt viel
 - Hoher Energieverbrauch – viel Hardware benötigt viel Energie



- Die höhere Integrationsdichte moderner Hardware könnte uns helfen
- Auch wenn sie andererseits höhere Fehlerraten bedingt
 - **Mehrkernprozessoren** „replizieren“ Rechenkerne
 - Sie erlauben die Ausführung mehrerer Replikate auf demselben Prozessor

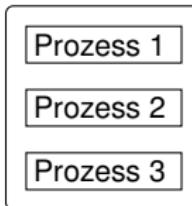


- Grundprinzip bleibt erhalten, nur **der Inhalt der SoR** ändert sich
 - Es werden keine kompletten Rechenknoten mehr repliziert
 - Sondern **nur die Berechnung** selbst, repräsentiert durch einen **Prozess**



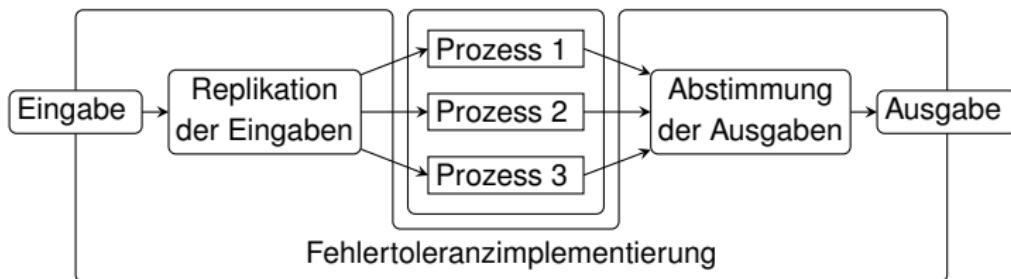
Process-Level Redundancy [5]

- Grundprinzip bleibt erhalten, nur **der Inhalt der SoR** ändert sich
 - Es werden keine kompletten Rechenknoten mehr repliziert
 - Sondern **nur die Berechnung** selbst, repräsentiert durch einen **Prozess**



Process-Level Redundancy [5]

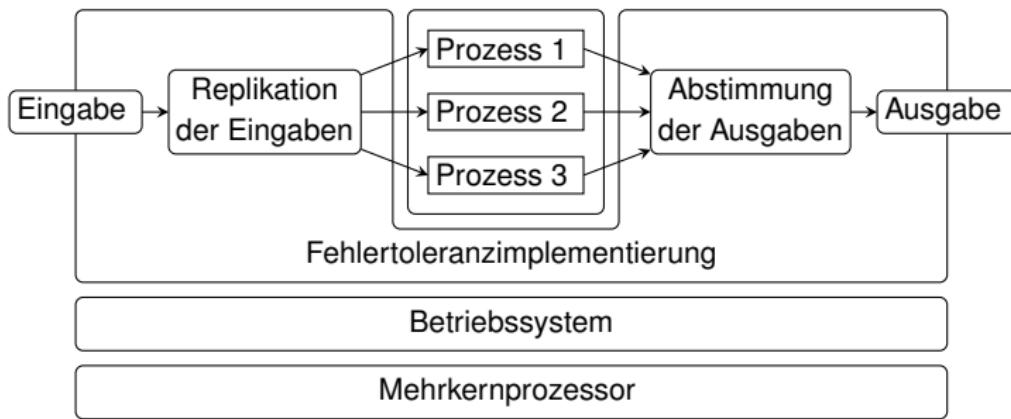
- Grundprinzip bleibt erhalten, nur **der Inhalt der SoR** ändert sich
 - Es werden keine kompletten Rechenknoten mehr repliziert
 - Sonder **nur die Berechnung** selbst, repräsentiert durch einen **Prozess**



- **Dedizierte Fehlertoleranzimplementierung** sorgt für
 - **Replikation der Eingaben** und die **Abstimmung der Ausgaben**
 - **Zeitliche Isolation** der einzelnen Replikate

Process-Level Redundancy [5]

- Grundprinzip bleibt erhalten, nur **der Inhalt der SoR** ändert sich
 - Es werden keine kompletten Rechenknoten mehr repliziert
 - Sonder **nur die Berechnung** selbst, repräsentiert durch einen **Prozess**



- **Dedizierte Fehlertoleranzimplementierung** sorgt für
 - **Replikation der Eingaben** und die **Abstimmung der Ausgaben**
 - **Zeitliche Isolation** der einzelnen Replikate
- **Basierend auf einem Echtzeitbetriebssystem**
 - Das **räumliche Isolation** sichert und **Mehrkernprozessoren** unterstützen

- Funktionsweise der Fehlertoleranzimplementierung
 - Annahme: Replikate kommunizieren nach außen **nur über Systemaufrufe**
 - Diese Annahme ist für Prozesse unter Linux durchaus valide



- Funktionsweise der Fehlertoleranzimplementierung
 - Annahme: Replikate kommunizieren nach außen **nur über Systemaufrufe**
 - Diese Annahme ist für Prozesse unter Linux durchaus valide
- ☞ Emulation der **Systemaufrufschnittstelle**
 - **Lesende Systemaufrufe** \leadsto Replikation der Eingabedaten
 - So findet automatisch eine Einigung über die Eingaben statt
 - **Schreibende Systemaufrufe** \leadsto Ausgaben puffern & Mehrheitsentscheid
 - Nicht **zurücknehmbare Seiteneffekte** sind problematisch
 - Sie dürfen erst durchgeführt werden, wenn ihre Korrektheit gesichert ist

- Funktionsweise der Fehlertoleranzimplementierung
 - Annahme: Replikate kommunizieren nach außen **nur über Systemaufrufe**
 - Diese Annahme ist für Prozesse unter Linux durchaus valide
- ☞ Emulation der **Systemaufrufschnittstelle**
 - **Lesende Systemaufrufe** \leadsto Replikation der Eingabedaten
 - So findet automatisch eine Einigung über die Eingaben statt
 - **Schreibende Systemaufrufe** \leadsto Ausgaben puffern & Mehrheitsentscheid
 - Nicht **zurücknehmbare Seiteneffekte** sind problematisch
 - Sie dürfen erst durchgeführt werden, wenn ihre Korrektheit gesichert ist
- **Synchronisation** der einzelnen Replikate
 - Zu ähnlichen Zeitpunkten werden identische Systemaufrufe getätigter
 - Sofern sich die einzelnen Replikate korrekt verhalten
 - Überwachung durch Ausgangsvergleich und durch **Auszeiten**
 - Die Fehlertoleranzimplementierung weiß, wann Systemaufrufe stattfinden
- **Replikdeterminismus**

- Funktionsweise der Fehlertoleranzimplementierung
 - Annahme: Replikate kommunizieren nach außen **nur über Systemaufrufe**
 - Diese Annahme ist für Prozesse unter Linux durchaus valide
- ☞ Emulation der **Systemaufrufschnittstelle**
 - **Lesende Systemaufrufe** \leadsto Replikation der Eingabedaten
 - So findet automatisch eine Einigung über die Eingaben statt
 - **Schreibende Systemaufrufe** \leadsto Ausgaben puffern & Mehrheitsentscheid
 - Nicht **zurücknehmbare Seiteneffekte** sind problematisch
 - Sie dürfen erst durchgeführt werden, wenn ihre Korrektheit gesichert ist
- **Synchronisation** der einzelnen Replikate
 - Zu ähnlichen Zeitpunkten werden identische Systemaufrufe getätigter
 - Sofern sich die einzelnen Replikate korrekt verhalten
 - Überwachung durch Ausgangsvergleich und durch **Auszeiten**
 - Die Fehlertoleranzimplementierung weiß, wann Systemaufrufe stattfinden
 - **Replikdeterminismus**
- Zeitliche Isolation durch **Überwachung der Laufzeit**
 - Überschreitung der Laufzeit führt z. B. zum Ablauen einer Auszeit



- **Vorteil:** Hardwareaufwand wurde deutlich reduziert
 - Nur ein Prozessor (mit mehreren Rechenkernen)
 - Kein gesondertes Kommunikationssystem zwischen den Replikaten
 - Damit sind direkt verbunden
 - Geringere Kosten, Gewicht, Energieverbrauch



- **Vorteil:** Hardwareaufwand wurde deutlich reduziert
 - Nur ein Prozessor (mit mehreren Rechenkernen)
 - Kein gesondertes Kommunikationssystem zwischen den Replikaten
 - Damit sind direkt verbunden
 - Geringere Kosten, Gewicht, Energieverbrauch
- **Nachteil:** Der Grad an Redundanz nimmt unweigerlich ab
 - Fehler in gemeinsamen Teilen können zu **Gleichtaktfehlern** führen
 - Prozessorcaches, Stromversorgung, Kommunikationssystem
 - Kompromiss aus Kosten und Nutzen

- **Vorteil:** Hardwareaufwand wurde deutlich reduziert
 - Nur ein Prozessor (mit mehreren Rechenkernen)
 - Kein gesondertes Kommunikationssystem zwischen den Replikaten
 - Damit sind direkt verbunden
 - Geringere Kosten, Gewicht, Energieverbrauch
- **Nachteil:** Der Grad an Redundanz nimmt unweigerlich ab
 - Fehler in gemeinsamen Teilen können zu **Gleichtaktfehlern** führen
 - Prozessorcaches, Stromversorgung, Kommunikationssystem
 - Kompromiss aus Kosten und Nutzen

Dennoch: Technologie der Zukunft

- Mehrkernprozessoren sind unaufhaltsam auf dem Vormarsch
 - Erste dedizierte Mehrkernprozessoren im Automobilbereich
- Gleichzeitig: einzelne Rechenkerne sind **nicht mehr sicher genug**
 - Transiente Fehlerrate macht Redundanz unvermeidbar



1 Grundlagen

- Arten von Redundanz
- Einsatz von Redundanz

2 Strukturelle Redundanz

- Replikation
- Fehlerhypothese
- Voraussetzungen
- Nutzen
- Kritische Bruchstellen

3 Umsetzungsalternativen und Beispiele

- Hardwarebasierte Replikation
- Softwarebasierte Replikation

4 Diversität



Beispiel: Ariane 5 (vgl. Folien II/16 ff)

- Beide Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen gleichzeitig aus
 - Ein Ganzzahlüberlauf wegen einer Eingabe außerhalb der Spezifikation
 - Die Bordcomputer OBC1 und OBC2 interpretieren den Fehlerwert falsch
 - Fehlerhaftes Lenkmanöver führt zur Zerstörung der Rakete



Beispiel: Ariane 5 (vgl. Folien II/16 ff)

- Beide Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen gleichzeitig aus
 - Ein Ganzzahlüberlauf wegen einer Eingabe außerhalb der Spezifikation
 - Die Bordcomputer OBC1 und OBC2 interpretieren den Fehlerwert falsch
 - Fehlerhaftes Lenkmanöver führt zur Zerstörung der Rakete
- ⚠ Ursache war ein **Gleichtaktfehler in homogenen Redundanzen**
 - Softwaredefekte sind typische Quellen für Gleichtaktfehler
 - Wie geht man mit Softwaredefekten um?
 - Wende **Redundanz bei der Entwicklung** solcher Systeme an!



- Beide Inertialmesssysteme SRI1 und SRI2 fallen gleichzeitig aus
 - Ein Ganzzahlüberlauf wegen einer Eingabe außerhalb der Spezifikation
 - Die Bordcomputer OBC1 und OBC2 interpretieren den Fehlerwert falsch
 - Fehlerhaftes Lenkmanöver führt zur Zerstörung der Rakete
- ⚠ Ursache war ein **Gleichtaktfehler in homogenen Redundanzen**
 - Softwaredefekte sind typische Quellen für Gleichtaktfehler
 - Wie geht man mit Softwaredefekten um?
 - Wende **Redundanz bei der Entwicklung** solcher Systeme an!
- ☞ Diversität (engl. *diversity*) ↗ heterogene Redundanzen
 - Auch **N-version programming**, mehr dazu siehe z. B. [4, Kapitel 6.6]
 - Man nehme „**mehrere verschiedene von allem**“
 - Entwicklungsteams, Programmiersprachen, Übersetzer, Hardwareplattformen
 - Alle entwickeln dasselbe System in mehreren Ausführungen
 - Annahme: Die Ergebnisse sind für sich **wahrscheinlich nicht fehlerfrei**
 - Aber sie enthalten **wahrscheinlich auch nicht dieselben Fehler**
 - Gleichtaktfehler dürften hier nicht mehr auftreten



Diversität ist sehr umstritten!



Problem: Diese Annahme stimmt nicht unbedingt

- Gleichtaktfehler verursachende Defekte röhren oft aus der **Spezifikation**
- Diese betrifft alle diversitären Entwicklungsvorhaben gleichermaßen
 - Was auch auf die Ariane 5 zugetroffen hätte ...



Diversität ist sehr umstritten!



Problem: Diese Annahme stimmt nicht unbedingt

- Gleichtaktfehler verursachende Defekte röhren oft aus der **Spezifikation**
- Diese betrifft alle diversitären Entwicklungsvorhaben gleichermaßen
 - Was auch auf die Ariane 5 zugetroffen hätte ...



Verwende verschiedene Spezifikationen als Ausgangspunkt

- Wie bekommt man dann die „verschiedenen“ Ausgaben unter einen Hut?
- Dies erfordert **komplexe Verfahren** beim Mehrheitsentscheid
 - Exakte Mehrheitsentscheide (engl. *exact voting*) sind vergleichsweise trivial
 - Unscharfe Mehrheitsentscheide (engl. *non-exact voting*) sind aus heutiger Sicht hingegen nicht besonders vielversprechend ...





Problem: Diese Annahme stimmt nicht unbedingt

- Gleichtaktfehler verursachende Defekte röhren oft aus der **Spezifikation**
- Diese betrifft alle diversitären Entwicklungsvorhaben gleichermaßen
 - Was auch auf die Ariane 5 zugetroffen hätte ...



Verwende verschiedene Spezifikationen als Ausgangspunkt

- Wie bekommt man dann die „verschiedenen“ Ausgaben unter einen Hut?
- Dies erfordert **komplexe Verfahren** beim Mehrheitsentscheid
 - Exakte Mehrheitsentscheide (engl. *exact voting*) sind vergleichsweise trivial
 - Unscharfe Mehrheitsentscheide (engl. *non-exact voting*) sind aus heutiger Sicht hingegen nicht besonders vielversprechend ...

- Diversität findet dennoch erfolgreich Anwendung (s. Folie 26)

- z. B. in asymmetrisch redundanten Systemen
 - Eine komplexe Berechnung wird durch eine einfache Komponente kontrolliert
 - Gepaart mit **fail-safe**-Verhalten im Fehlerfall
 - Was bei Eisenbahnsignalanlagen sehr gut funktioniert
- z. B. in der Reaktornotabschaltung vieler Kernkraftwerke
 - Der Mehrheitsentscheid funktioniert nach dem Schema auf Folie 28



Redundanz → hat mehrere Dimensionen

- Grundvoraussetzung für Fehlertoleranz
- Redundanz in **Struktur**, Funktion, **Information**, oder Zeit
- **Fehlererkennung**, -diagnose, -eindämmung, -maskierung

Replikation → koordinierter Einsatz struktureller Redundanz

- Replikation der **Eingaben**, Abstimmung der **Ausgaben**
- Replikate für **fail-silent**, **fail-consistent**, malicious
- Zeitliche und **räumliche Isolation** einzelner Replikate

Hardwarebasierte Replikation → Umfassend und teuer

- Dreifache Auslegung, toleriert **Fehler im Wertebereich**
- Zuverlässigkeit von Replikat und Gesamtsystem

Softwarebasierte Replikation → Flexibel aber eingeschränkt

- Process Level Redundancy **reduziert Kosten** von TMR, zulasten eines geringeren Schutzes

Diversität → versucht **Gleichtaktfehler** auszuschließen



- [1] *Computers in Spaceflight: The NASA Experience.*
<http://history.nasa.gov/computers/contents.html>, Apr. 1987
- [2] Carlow, G. D.:
Architecture of the space shuttle primary avionics software system.
In: *Communications of the ACM* 27 (1984), Nr. 9, S. 926–936.
<http://dx.doi.org/10.1145/358234.358258>. –
DOI 10.1145/358234.358258. –
ISSN 0001-0782
- [3] Echtle, K. :
Fehlertoleranzverfahren.
Berlin, Germany : Informatik Springer, 1990. –
ISBN ISBN 978-0-3875-2680-5
- [4] Kopetz, H. :
Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications.
First Edition.
Kluwer Academic Publishers, 1997. –
ISBN 0-7923-9894-7

- [5] Shye, A. ; Moseley, T. ; Reddi, V. J. ; Blomstedt, J. ; Connors, D. A.:
Using Process-Level Redundancy to Exploit Multiple Cores for Transient Fault Tolerance.
In: *Proceedings of the 37th International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN '07)*.
Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, Jun. 2007. –
ISBN 0-7695-2855-4, S. 297–306
- [6] Ulbrich, P. :
Echtzeitsysteme.
http://www4.cs.fau.de/Lehre/WS16/V_EZS/, 2016
- [7] Yeh, Y. :
Triple-triple redundant 777 primary flight computer.
In: *Proceedings of the 1996 IEEE Aerospace Applications Conference*.
Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, Febr. 1996. –
ISBN 978-0780331969, S. 293–307