

Verlässliche Echtzeitsysteme

Redundanz und Fehlertoleranz

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

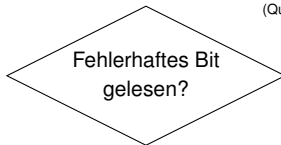
<https://www4.cs.fau.de>

06. Mai 2019



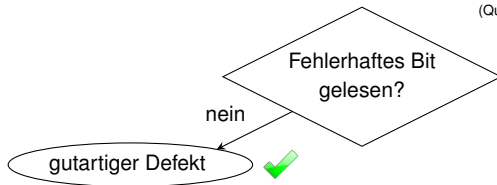
- Erinnerung: **transiente Fehler** (engl. *soft errors*) (s. III/31)
 - Treten wie sporadische Fehler **unregelmäßig** auf ...
 - Bewirken kurzzeitige Fehlfunktion $\leadsto$ Defekt, Fehler, Fehlverhalten
- **Datenfehler** (SDC) und **unkorrigierbare Fehler** (DUE) (s. III/10)

(Quelle: Architecture Design for Soft Errors [5])



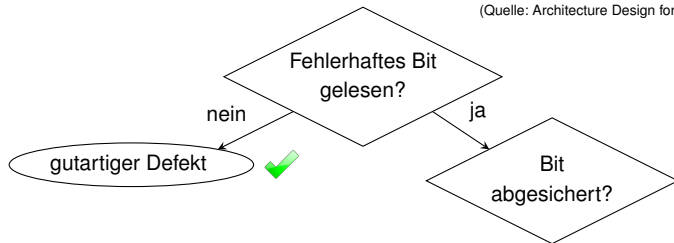
- Erinnerung: **transiente Fehler** (engl. *soft errors*) (s. III/31)
 - Treten wie sporadische Fehler **unregelmäßig** auf ...
 - Bewirken kurzzeitige Fehlfunktion $\leadsto$ Defekt, Fehler, Fehlverhalten
- **Datenfehler** (SDC) und **unkorrigierbare Fehler** (DUE) (s. III/10)

(Quelle: Architecture Design for Soft Errors [5])



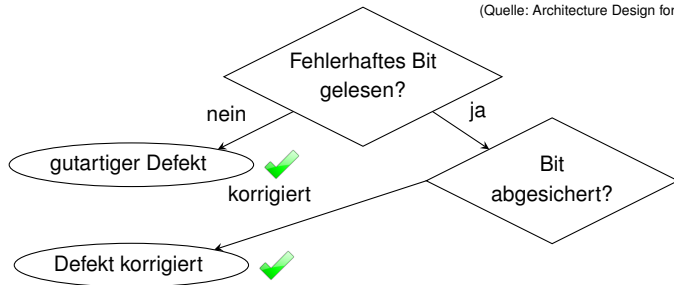
- Erinnerung: **transiente Fehler** (engl. *soft errors*) (s. III/31)
 - Treten wie sporadische Fehler **unregelmäßig** auf ...
 - Bewirken kurzzeitige Fehlfunktion $\leadsto$ Defekt, Fehler, Fehlverhalten
- **Datenfehler** (SDC) und **unkorrigierbare Fehler** (DUE) (s. III/10)

(Quelle: Architecture Design for Soft Errors [5])



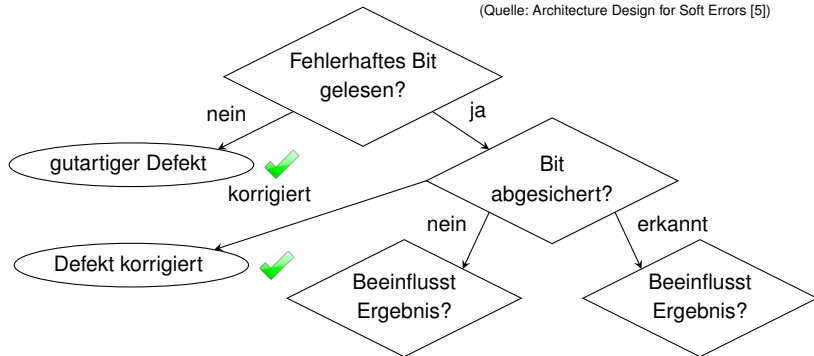
- Erinnerung: **transiente Fehler** (engl. *soft errors*) (s. III/31)
 - Treten wie sporadische Fehler **unregelmäßig** auf ...
 - Bewirken kurzzeitige Fehlfunktion $\leadsto$ Defekt, Fehler, Fehlverhalten
- **Datenfehler (SDC)** und **unkorrigierbare Fehler (DUE)** (s. III/10)

(Quelle: Architecture Design for Soft Errors [5])



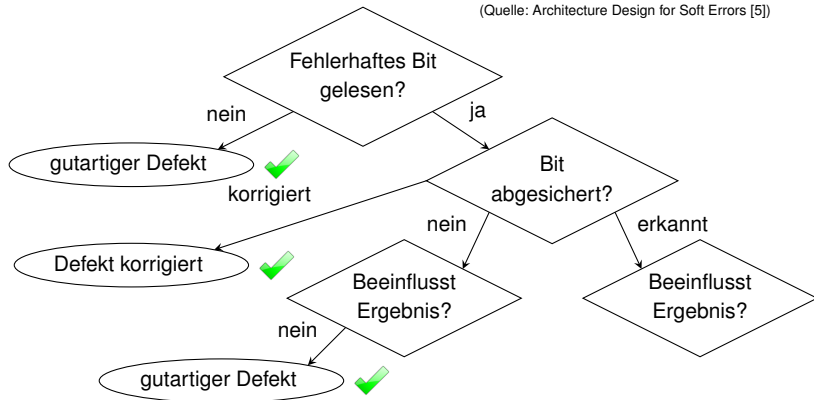
- Erinnerung: **transiente Fehler** (engl. *soft errors*) (s. III/31)
 - Treten wie sporadische Fehler **unregelmäßig** auf ...
 - Bewirken kurzzeitige Fehlfunktion $\leadsto$ Defekt, Fehler, Fehlverhalten
- **Datenfehler (SDC)** und **unkorrigierbare Fehler (DUE)** (s. III/10)

(Quelle: Architecture Design for Soft Errors [5])



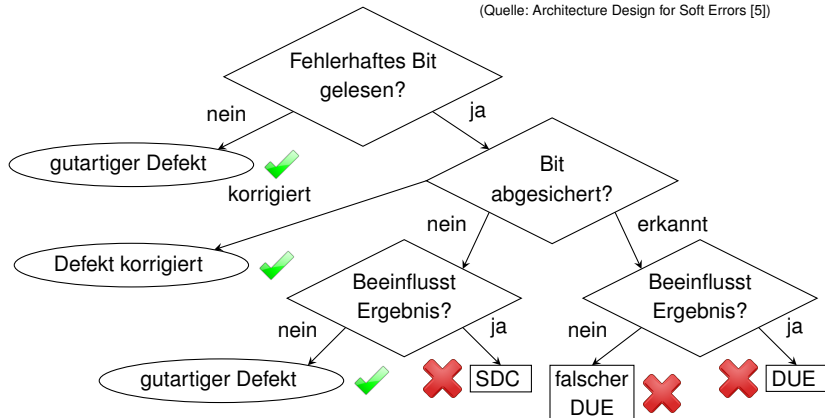
- Erinnerung: **transiente Fehler** (engl. *soft errors*) (s. III/31)
 - Treten wie sporadische Fehler **unregelmäßig** auf ...
 - Bewirken kurzzeitige Fehlfunktion $\leadsto$ Defekt, Fehler, Fehlverhalten
- **Datenfehler** (SDC) und **unkorrigierbare Fehler** (DUE) (s. III/10)

(Quelle: Architecture Design for Soft Errors [5])



- Erinnerung: **transiente Fehler** (engl. *soft errors*) (s. III/31)
 - Treten wie sporadische Fehler **unregelmäßig** auf ...
 - Bewirken kurzzeitige Fehlfunktion $\leadsto$ Defekt, Fehler, Fehlverhalten
- **Datenfehler** (SDC) und **unkorrigierbare Fehler** (DUE) (s. III/10)

(Quelle: Architecture Design for Soft Errors [5])





Ungehemmte Fehlerfortpflanzung führt zum Systemversagen

- **Unerkannte Datenfehler** (engl. *silent data corruption*) (vgl. III/10)
 - Bedingen beispielsweise fehlerhafte Stellwerte für Aktoren
 - 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 Aktoren
 - 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

- **Problematis**: Robuste Auslegung aller Komponenten ist häufig nicht möglich
 - Diese müssten frei von **konzeptionellen Fehler** sein (→ keinerlei Hardware- oder Softwaredefekte)
 - Sie müsste widrigen **äußeren 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** $\leadsto$ (typisch) hardwarebasierte Fehlertoleranzlösungen
 - **Mehrfache Auslegung**: Prozessoren, Speicher, Sensoren, Aktoren, ...





Arten von Redundanz



Redundanz ist eine **Grundvoraussetzung** für Fehlertoleranz



Strukturelle Redundanz (dieses Kapitel)

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



Funktionelle Redundanz

- Bereitstellung mehrerer **verschiedenartiger** Komponenten
 - Mehrfache Herleitung desselben Sachverhalt auf verschiedenen Wegen
 - Ventilstellung $\leadsto$ 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** $\leadsto$ (typisch) hardwarebasierte Fehlertoleranzlösungen
 - **Mehrfache Auslegung**: Prozessoren, Speicher, Sensoren, Aktoren, ...



Funktionelle Redundanz

- Bereitstellung mehrerer **verschiedenartiger** Komponenten
 - Mehrfache Herleitung desselben Sachverhalt auf verschiedenen Wegen
 - Ventilstellung $\leadsto$ 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** $\leadsto$ (typisch) hardwarebasierte Fehlertoleranzlösungen
 - **Mehrfache Auslegung**: Prozessoren, Speicher, Sensoren, Aktoren, ...



Funktionelle Redundanz

- Bereitstellung mehrerer **verschiedenartiger** Komponenten
 - Mehrfache Herleitung desselben Sachverhalt auf verschiedenen Wegen
 - Ventilstellung $\leadsto$ 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

Anwendungstransparenz

Implementierungsebene (Strukturelement)	Redundanzart			
	Information	Struktur	Funktion	Zeit
Voll- / Paravirtualisierung (Virtuelle Maschine)				
Partielle Virtualisierung (Prozessinkarnation)		Redundanztechnik		Redundanztechnik
Anwendung (Algorithmus)			Redundanztechnik	
Befehlssatz (Instruktion)	Redundanztechnik			
Redundanzstrategie (Beispiel)	Paritätsbits CRC Prüfsummen Codierung	2-fach Redundanz 3-fach Redundanz Replikation	Funktionswächter Konkrete Realisierung (Beispiel)	Schlupfzeit Numerische Algorithmen



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**

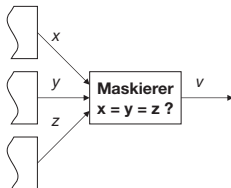
¹ Funktionelle und zeitliche Redundanz lassen sich in der Praxis nur fallspezifisch implementieren und stehen daher außerhalb des Veranstaltungskontextes.



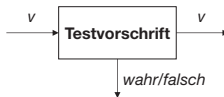


Fehlererkennung – Grundlagen

Relativtest



Akzeptanztest

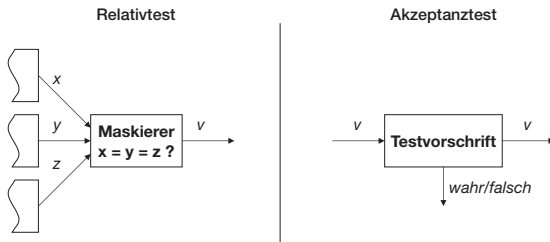


Zwei Testverfahren zur Fehlererkennung (vgl. [3, S.78 ff])





Fehlererkennung – Grundlagen



⚠ 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**

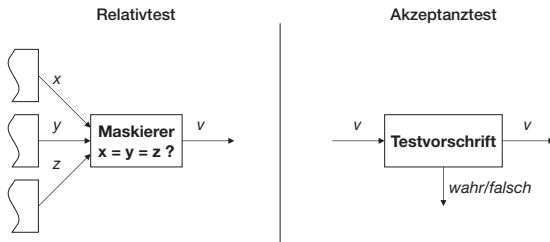
→ **Mehrheitsentscheider** (engl. *voter*) (auch Maskierer)

⚠ Ausschließlich bei struktureller Redundanz anwendbar





Fehlererkennung – Grundlagen



⚠ 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





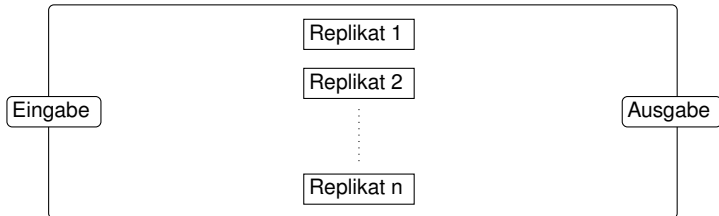
Replikation ist der koordinierte Einsatz struktureller Redundanz





Replikation ist der koordinierte Einsatz struktureller Redundanz

- Aufbau eines Replikationsbereichs (engl. *Sphere of Replication, SoR*) [6]
 - Sie maskiert transparent Fehler in einzelnen Replikaten

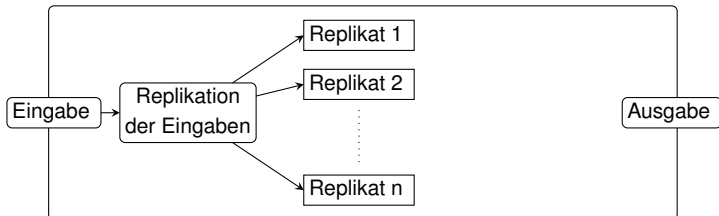


Replikation



Replikation ist der koordinierte Einsatz struktureller Redundanz

- Aufbau eines Replikationsbereichs (engl. *Sphere of Replication, SoR*) [6]
 - Sie maskiert transparent Fehler in einzelnen Replikaten



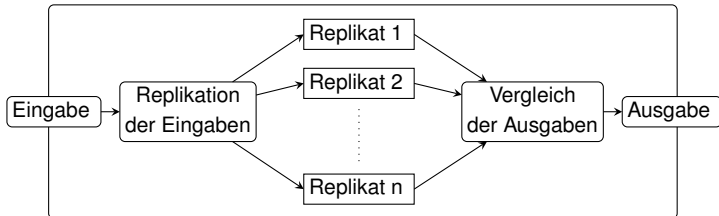
- Eingaben werden repliziert und auf die Replikate verteilt





Replikation ist der koordinierte Einsatz struktureller Redundanz

- Aufbau eines Replikationsbereichs (engl. *Sphere of Replication, SoR*) [6]
 - Sie maskiert transparent Fehler in einzelnen Replikaten



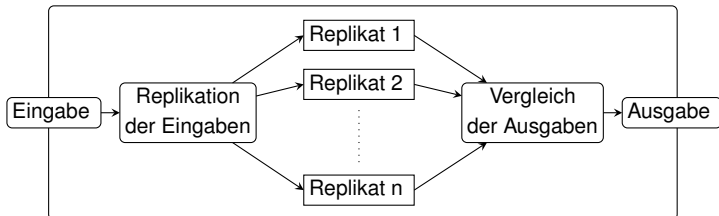
- Eingaben werden repliziert und auf die Replikate verteilt
- In einem Ausgangsvergleich werden die Ausgaben abgestimmt





Replikation ist der koordinierte Einsatz struktureller Redundanz

- Aufbau eines Replikationsbereichs (engl. *Sphere of Replication, SoR*) [6]
 - 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 Fehlverhalten 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 Fehlverhalten 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 Fehlverhalten 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“

↪ Anzahl der Replikate $n = f + 1$

- Ein Replikat erzeugt korrekt oder gar keine Antworten
- Das Fehlverhalten 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



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 Fehlverhalten 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“

- „böartige“, 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 Fehlverhalten 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 $n = 3f + 1$

- „böartige“, 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 14 f)
- Sich replikdeterministisch verhalten (vgl. Folie 16 ff)



Fehlerhypothese (engl. *fault hypothesis*)

Annahmen über das Verhalten einzelner Replikate im Fehlerfall



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 14 f)
- Sich replikdeterministisch verhalten (vgl. Folie 16 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 korumpiert 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





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





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 Aktoren 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 Aktoren 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 **Wettlaufsituation** (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 **Wettlaufsituation** (engl. *data races*) erwachsen sind
- **Nicht-deterministische Konstrukte** der Programmiersprache
 - z. B. die **SELECT**-Anweisung der Programmiersprache Ada



■ 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



■ 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



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

■ Statische Kontrollstruktur

- Kontrollentscheidungen sind **unabhängig von Eingabedaten**
 - Ermöglicht außerdem eine statische Analyse dieser Entscheidungen
- Programmunterbrechungen sind mit größter Vorsicht einzusetzen

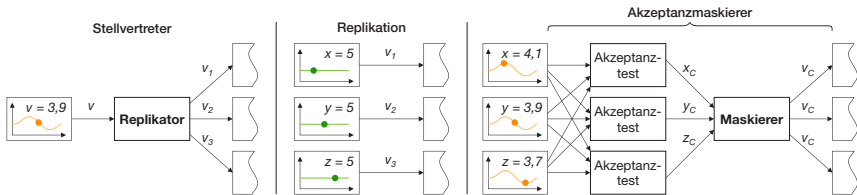
■ Deterministische Algorithmen

- Keine randomisierten Verfahren, nur stabile Sortiervverfahren, . . .





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 $R_{tmr} = R_v(R_r^3 + 3R_r^2(1 - R_r))$





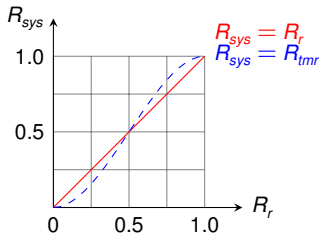
Erhöht sich durch Replikation in jedem Fall die Zuverlässigkeit?

- 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 11 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 11 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 $\leadsto$ **Sensorfusion** (engl. *sensor fusion*)
- **Repliziere 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

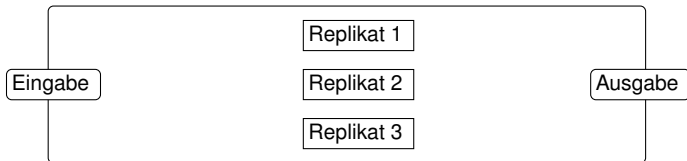
3 Umsetzungsalternativen und Beispiele

- Hardwarebasierte Replikation
- Softwarebasierte Replikation

4 Diversität



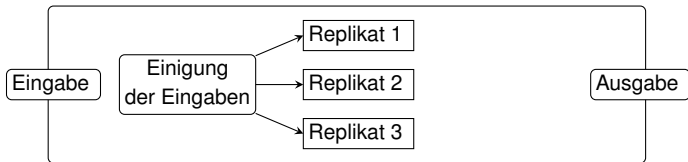
Hardware Triple Modular Redundancy (TMR)



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



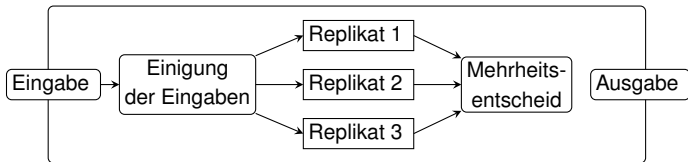
Hardware Triple Modular Redundancy (TMR)



- 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 [7, Kapitel 8] und Replikdeterminismus



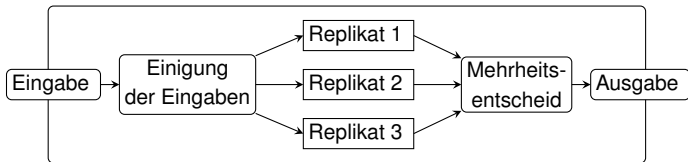
Hardware Triple Modular Redundancy (TMR)



- 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 [7, 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 [7, 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

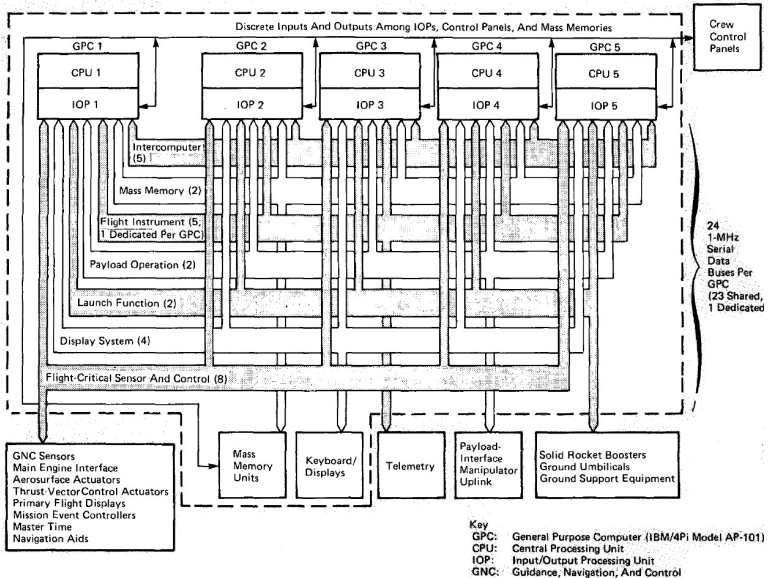
- **Unregelmäßige und eher seltene Zustandsicherung**
 - Potentiell **großer Abstand der Redundanzen**
 - Potentiell **langwierige Fehlererholung**



Fokus: Replizierte Systeme im „hot standby“-Betrieb



Beispiel: Steuerung des Space Shuttle [2]



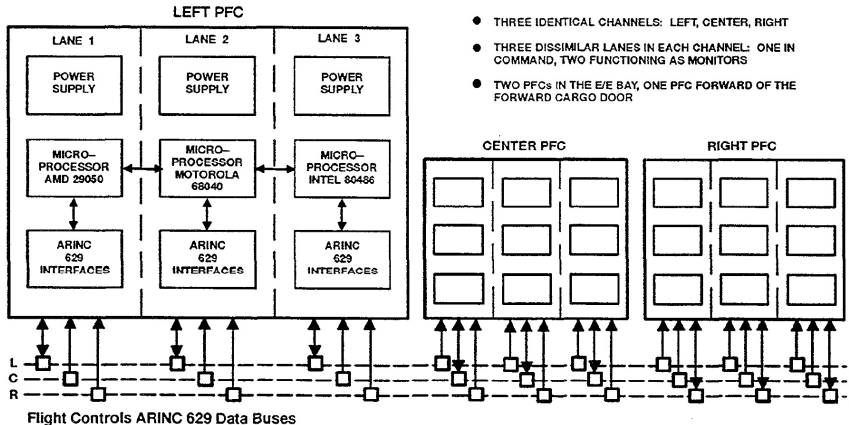
- Insgesamt **fünf redundante Rechensysteme** [1, Kapitel 4.4]
 - Ursprünglich gewünschte: **fail-operational/fail-operational/fail-safe**
 - Verlust eines Kontrollrechners ändert nichts an der Funktionsfähigkeit
 - Das Gesamtsystem behält immer noch die Eigenschaft **fail-operational**
 - Das war jedoch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



Beispiel: Steuerung des Boeing 777 [8]



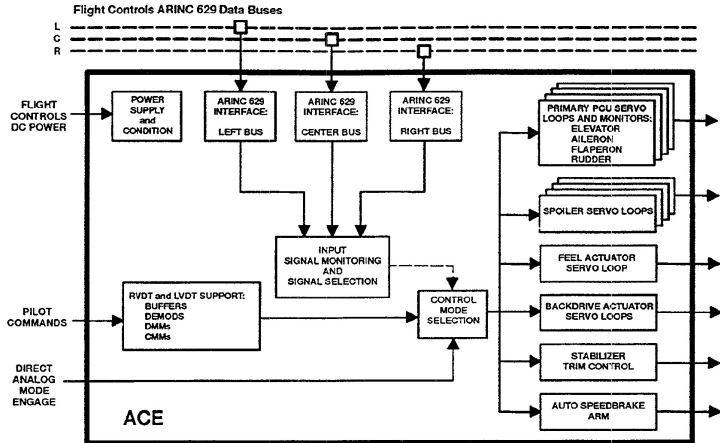
■ **Drei identische redundante Kanäle:** links, mitte, rechts

■ Bestehend aus jeweils **drei diversitären redundanten Pfaden**

■ **Räumliche Verteilung** innerhalb des Flugzeugs

■ Minimierung der Auswirkungen z. B. von Blitzschlägen





Mehrheitsentscheid beim Aktor

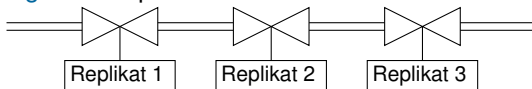
- ACE = actuator control electronics
- Die Aktoren selbst sind ebenfalls redundant



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



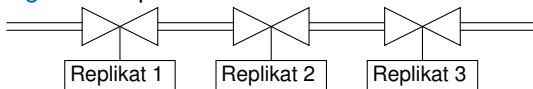
- Jedes Replikat kontrolliert jeweils ein Ventil
 - Vorgehensweise und Schaltfunktion ist hochgradig problemspezifisch
 - Auch anwendbar auf elektronische Schaltkreise und Relais
- **Reihenschaltung** von Absperrventilen



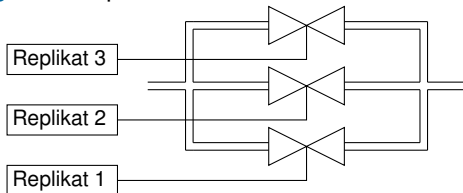
- Um den Fluss zu stoppen, genügt ein korrektes Replikat

- 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
- Parallelschaltung 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



Hardwarebasierte Replikation – Vorteile und Nachteile

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

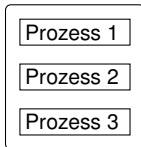


- Grundprinzip bleibt erhalten, nur **der Inhalt der SoR** ändert sich
 - Es werden keine kompletten Rechenknoten mehr repliziert
 - Sondern **nur die Berechnung** selbst, repräsentiert durch einen **Prozess**



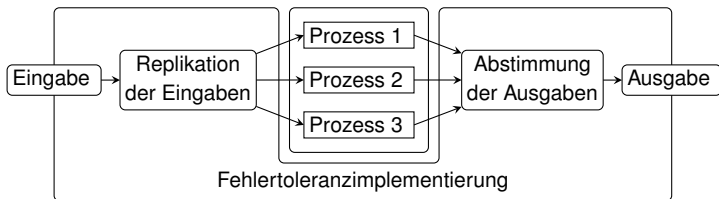
Process-Level Redundancy [6]

- 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 [6]

- 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**

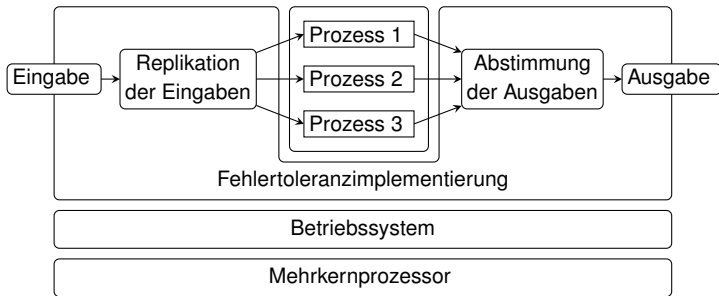


- **Dedizierte Fehlertoleranzimplementierung** sorgt für
 - Replikation der Eingaben und die Abstimmung der Ausgaben
 - Zeitliche Isolation der einzelnen Replikate



Process-Level Redundancy [6]

- 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**



- **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** unterstützt



- 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 **Systemaufrufsschnittstelle**

- **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 **Systemaufrufsschnittstelle**

- **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 getätigt
 - 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 **Systemaufrufsschnittstelle**

- **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 getätigt
 - 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 Ablaufen 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



- 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

- 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*) $\leadsto$ **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





Problem: Diese Annahme stimmt nicht unbedingt

- Gleichtaktfehler verursachende Defekte rühren 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 rühren 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
 - **Unschärfe Mehrheitsentscheide** (engl. *non-exact voting*) sind aus heutiger Sicht hingegen nicht besonders vielversprechend ...





Problem: Diese Annahme stimmt nicht unbedingt

- Gleichtaktfehler verursachende Defekte rühren 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 27)

- 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 29



Redundanz $\mapsto$ hat mehrere Dimensionen

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

Replikation $\mapsto$ 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 $\mapsto$ Umfassend und teuer

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

Softwarebasierte Replikation $\mapsto$ Flexibel aber eingeschränkt

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

Diversität $\mapsto$ 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] Ehtle, 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] Mukherjee, S. :
Architecture Design for Soft Errors.
San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2008. –
ISBN 978–0–12–369529–1



- [6] 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
- [7] Ulbrich, P. :
Echtzeitsysteme.
http://www4.cs.fau.de/Lehre/WS16/V_EZS/, 2016
- [8] 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

