

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



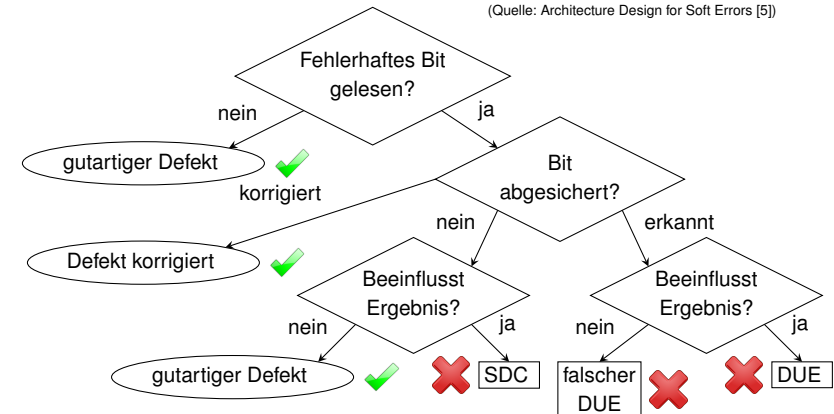
Wiederholung – Fehlerarten

■ 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])



Das Problem

Wiederholung: Fehlerkette und Fehlerfortpflanzung



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

- **Problematisches:** Robuste Auslegung aller Komponenten ist häufig nicht möglich
 - Diese müssten frei von **konzeptionellen Fehlern** sein (\rightarrow 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 (\leadsto **Transparenz**)



Übersicht – Fehlertoleranz durch Redundanz

Was tun gegen unzuverlässige Komponenten?

■ **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**
- \rightarrow Maskierung **transienter Hardwarefehler** durch **redundante Ausführung**

■ **Vermeidung von Gleichtaktfehlern durch Diversität**

- „Replizierte Entwicklung“ der einzelnen Redundanzen



Gliederung

- 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



Ziele von Fehlertoleranz

Was man mit dem Mehraufwand eigentlich bezweckt!

- **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



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, ...)

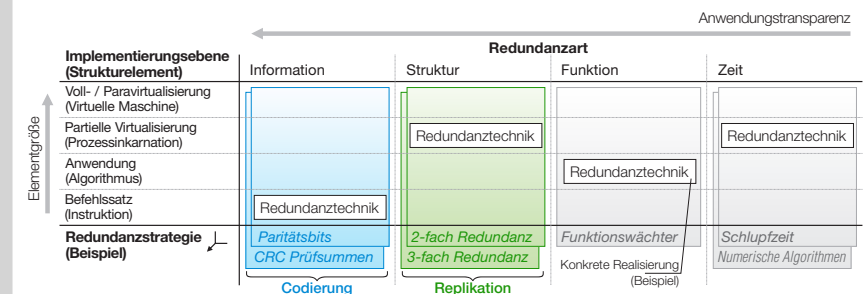


Zeitliche Redundanz

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



Koordinierter Einsatz von Redundanz



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

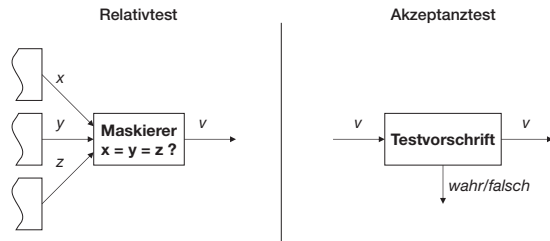
→ Konkrete **Redundanztechnik**

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





Fehlererkennung – Grundlagen



⚠ 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**

\rightarrow **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



Gliederung

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

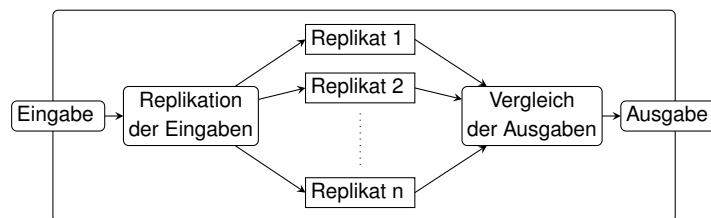


Replikation

⚠ 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**

„fail-silent“

\rightarrow Anzahl der Replikate $n = f + 1$

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

„fail-consistent“

\rightarrow Anzahl der Replikate $n = 2f + 1$

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

„malicious“

\rightarrow 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*)



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**



Fehlerisolation

- 📖 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 korrumpiert 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
- 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*)



Replikdeterminismus

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!**
 - 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



Phänomene, die Replikdeterminismus verhindern

- **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

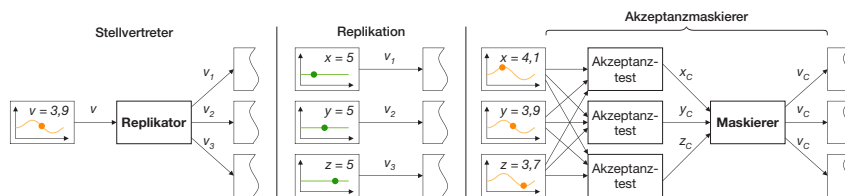


Wie stellt man Replikdeterminismus sicher?

- **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 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



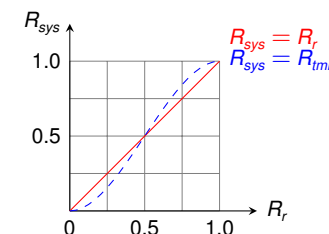
Zuverlässigkeitsgewinn durch Replikation

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 $\sim R_v$
 - Zwei Replikate korrekt funktionieren $\sim R_{2/3} = R_r^3 + 3R_r^2(1 - R_r)$
 - 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 $R_v > 0.9$



Verbliebene kritische Bruchstellen



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 → **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**

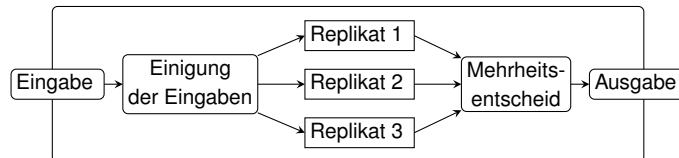


Gliederung

- 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
- **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**



Hardwarebasierte Replikation

Umsetzungsalternativen und Zustände

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

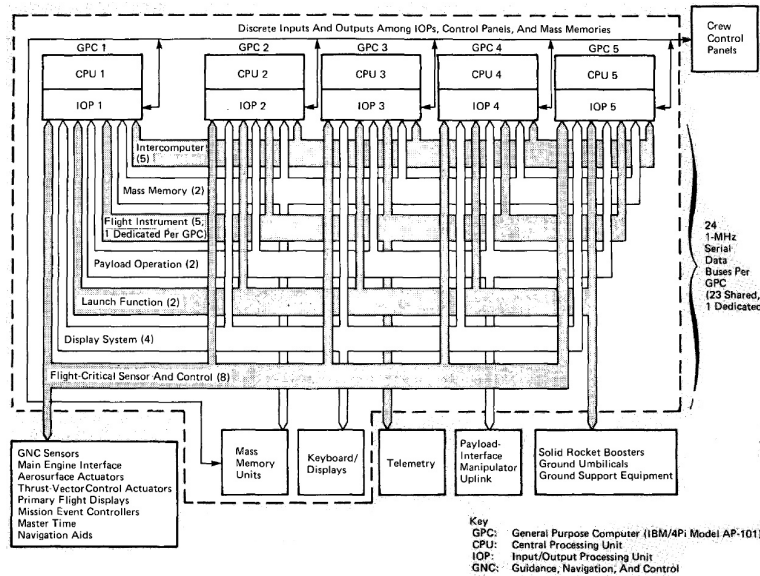
Cold standby: Sekundärsystem startet im Fehlerfall

- **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]



pu Verlässliche Echtzeitsysteme (SS 19) – Kapitel IV Redundante Ausführung
4 Umsetzungsalternativen und Beispiele – 4.1 Hardwarebasierte Replikation

25/39

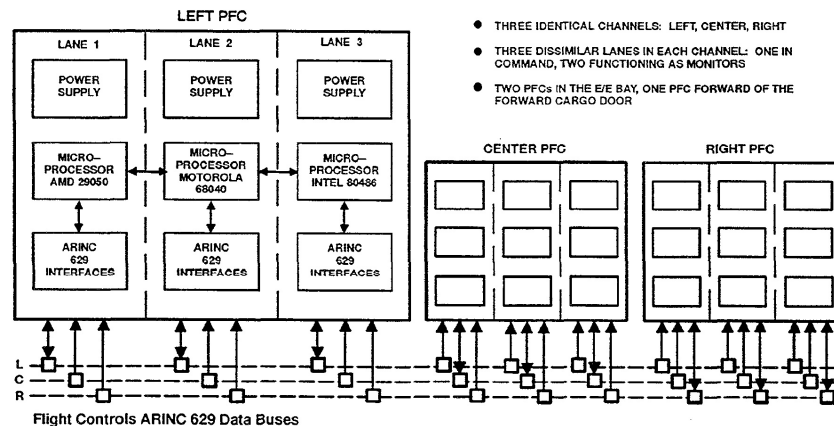
Beispiel: Steuerung des Space Shuttle (Forts.)

- 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 Systeme** laufen weiterhin simultan
 - Das dritte System übernimmt Lebenserhaltungssysteme, ...
 - Das vierte und fünfte Systeme sind Backup → „cold standby“

pu Verlässliche Echtzeitsysteme (SS 19) – Kapitel IV Redundante Ausführung
4 Umsetzungsalternativen und Beispiele – 4.1 Hardwarebasierte Replikation

26/39

Beispiel: Steuerung des Boeing 777 [8]

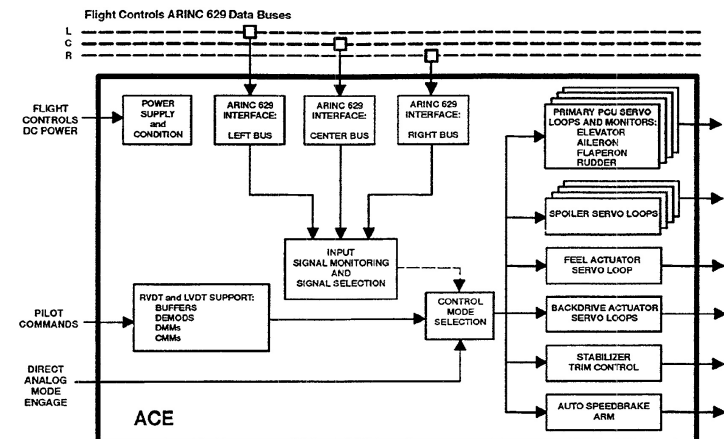


- **Drei identische redundante Kanäle:** links, mitte, rechts
 - Bestehend aus jeweils **drei diversitären redundanten Pfaden**
- **Räumliche Verteilung** innerhalb des Flugzeugs
 - Minimierung der Auswirkungen z. B. von Blitzschlägen

pu Verlässliche Echtzeitsysteme (SS 19) – Kapitel IV Redundante Ausführung
4 Umsetzungsalternativen und Beispiele – 4.1 Hardwarebasierte Replikation

27/39

Beispiel: Steuerung des Boeing 777 [8] (Forts.)



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

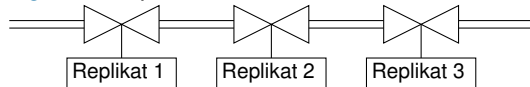
pu Verlässliche Echtzeitsysteme (SS 19) – Kapitel IV Redundante Ausführung
4 Umsetzungsalternativen und Beispiele – 4.1 Hardwarebasierte Replikation

28/39

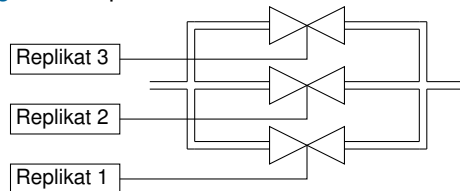
Mehrheitsentscheid am Aktor

Am Beispiel von Rohrleitungen und Ventilen

- 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



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



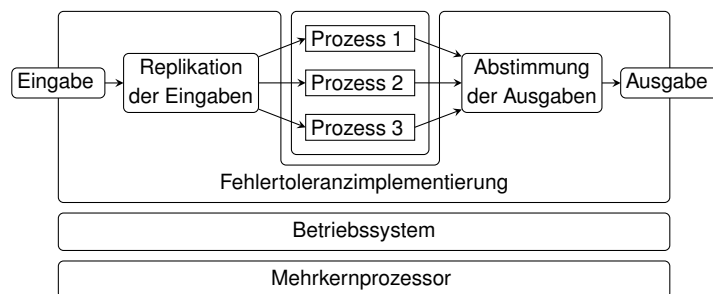
Die höhere Integrationsdichte moderner Hardware könnte uns helfen

- Auch wenn sie andererseits höhere Fehlerraten bedingt
- Mehrkernprozessoren „replizieren“ Rechenkerne
 - Sie erlauben die Ausführung mehrerer Replikate auf demselben Prozessor



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



Process-Level Redundancy [6] (Forts.)

- Funktionsweise der Fehlertoleranzimplementierung
 - Annahme: Replikate kommunizieren nach außen nur über Systemaufrufe
 - Diese Annahme ist für Prozesse unter Linux durchaus valide
- Emulation der Systemaufrufchnittstelle
 - Lesende Systemaufrufe ~> Replikation der Eingabedaten
 - So findet automatisch eine Einigung über die Eingaben statt
 - Schreibende Systemaufrufe ~> 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 Ablauf einer Auszeit



Vergleich mit TMR

- **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



Gliederung

- 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



Ursache war ein **Gleichtaktfehler in homogenen Redundanzen**

- Softwaredefekte sind typische Quellen für Gleichaktfehler
 - 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**
 - Gleichaktfehler dürften hier nicht mehr auftreten



Diversität ist sehr umstritten!



Problem: Diese Annahme stimmt nicht unbedingt

- Gleichaktfehler 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 ...

- 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



Zusammenfassung

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 Wertbereich**
- **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



Literaturverzeichnis

- [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] Mukherjee, S. :
Architecture Design for Soft Errors.
San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2008. –
ISBN 978–0–12–369529–1



Literaturverzeichnis (Forts.)

- [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

