

Verlässliche Echtzeitsysteme

Redundante Ausführung

Fabian Scheler

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)
www4.informatik.uni-erlangen.de

12. Juni 2012



- 1 Überblick
- 2 Grundlagen
 - Fehlertypen
 - Redundanz
 - Replikation
 - Fehlerhypothese
- 3 Triple Modular Redundancy
- 4 Process-Level Redundancy
- 5 Diversität
- 6 Zusammenfassung



- Maskierung transienter Hardwarefehler durch redundante Ausführung
 - grundlegender Aufbau replizierter Systeme
 - Auf welcher Ebene wird Redundanz angewandt?
 - Welche Eigenschaften müssen die einzelnen Replikate erfüllen?
- Triple Modular Redundancy
 - die klassische Lösung für die Auslegung fehlertoleranter Systeme
 - Replikation auf Ebene des Knotens bzw. der Hardware
 - Fokussierung auf Triple Modular Redundancy
 - prinzipiell sind n -fach redundante Systeme denkbar, $n = 2, \dots$
- Process-Level Redundancy
 - redundante Ausführung unter Zuhilfenahme von Mehrkernprozessoren
 - Replikation auf Ebene von Prozessen bzw. Software
- Vermeidung von Gleichtaktfehlern durch Diversität
 - „replizierte Entwicklung“ der einzelnen Redundanzen



1 Überblick

2 Grundlagen

- Fehlertypen
- Redundanz
- Replikation
- Fehlerhypothese

3 Triple Modular Redundancy

4 Process-Level Redundancy

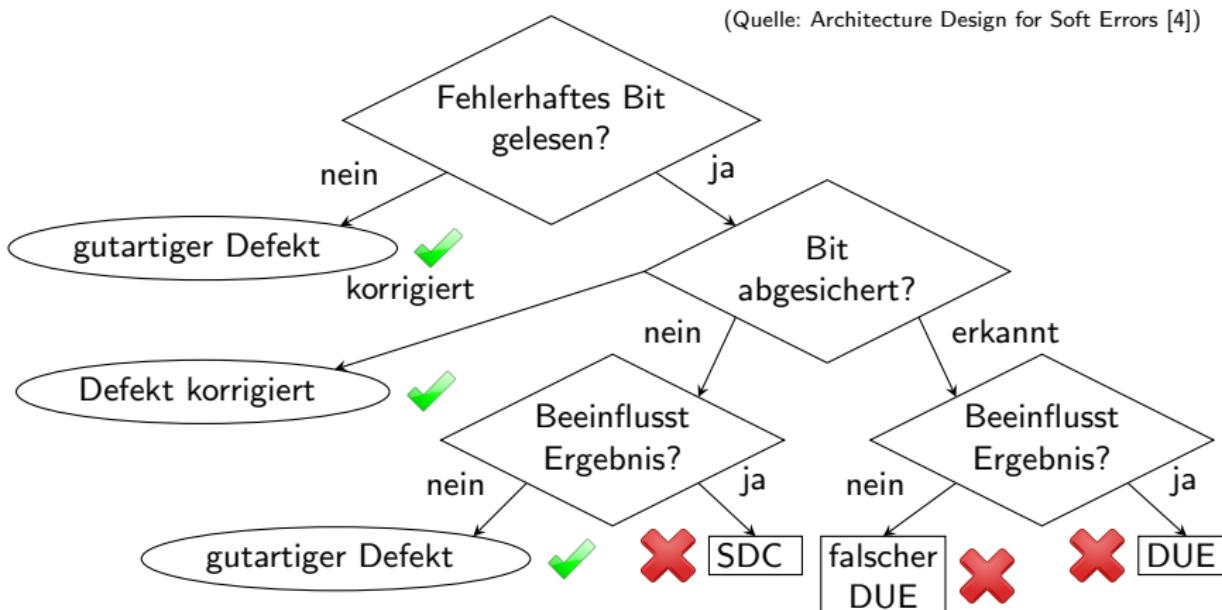
5 Diversität

6 Zusammenfassung



Klassifikation – Fehlertypen

- Erinnerung: **transiente Fehler** (engl. *transient faults*) (s. Folie III/9)
 - treten wie sporadische Fehler **unregelmäßig** auf ...
 - münden i. d. R. aber nicht in einem permanenten Fehler
- **Datenfehler (SDC)** und **unkorrigierbare Fehler (DUE, s. Folie III/11)**



- ungehemmte Fehlerfortpflanzung führt zum Systemversagen
 - Datenfehler (engl. *silent data corruption*)
 - 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 je nach Anwendung erforderlich

- **Problematik:** eine entsprechend robuste Auslegung einzelner Komponenten ist häufig nicht möglich
 - diese Komponente müsste frei von konzeptionellen Fehler sein, also keinerlei Hardware- oder Softwaredefekte etc. enthalten
 - sie müsste auch allerlei widrigen äußeren Umständen trotzen
- **Lösung:** man benötigt ein System, das einzelne Fehler tolerieren kann
 - einzelne Komponenten können ausfallen ...
 - dies wird durch andere **redundante Komponenten** aufgefangen,
 - die gewünschte Funktionalität an der Schnittstelle bleibt erhalten
 - der Anwender bekommt davon möglichst nichts mit (→ **Transparenz**)



- Fehlertoleranz erfordert immer Redundanz

räumliche Redundanz

- typisch für **hardwarebasierte** Fehlertoleranzlösungen
- **mehrfache Auslegung**: Prozessoren, Speicher, Sensoren, Aktoren, ...
- redundante Instanzen agieren häufig **simultan**

zeitliche Redundanz

- typisch für **software-basierte** Herangehensweisen
- meist wird nur die Berechnung redundant ausgeführt
- **mehrfache, zeitlich versetzte Ausführung** redundanter Komponenten

funktionale Redundanz

- **mehrfache Herleitung** desselben Sachverhalt auf verschiedenen Wegen
 - Geschwindigkeit \sim Drehzahlmesser bzw. Beschleunigungssensor
- orthogonal zu räumlicher und zeitlicher Redundanz

Fokus: zeitlich und räumlich redundante Ausführung



Zustand redundanter Systeme

Wie verhalten sich die redundanten Systeme zueinander?

hot standby redundante Systeme arbeiten **simultan**

- sie verarbeiten gleichzeitig dieselben Eingaben
- ihr Zustand ist **jederzeit konsistent**
 - ~ nahtloser Ersatz für ausgefallene Redundanzen

warm standby Unterscheidung von **Primär- und Sekundärsystem**

- Sekundärsystem läuft im **Hintergrund**
 - regelmäßige Zustandssicherung des Primärsystems (engl. *checkpoint*)
 - 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: redundante Systeme im „hot standby“-Betrieb



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

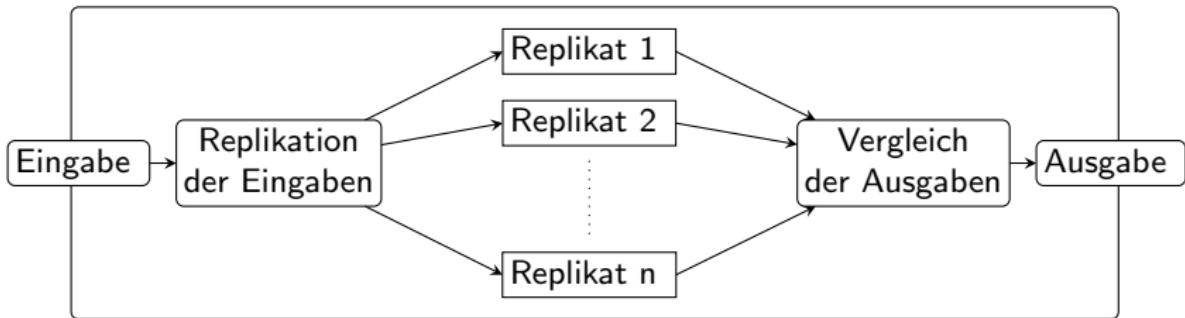
Wiederaufsetzen (engl. *recovery*)

- Wiederherstellen eines funktionsfähigen Zustands nach Fehlern
 - Reparatur (engl. *repair*) bzw. Rekonfiguration (engl. *reconfiguration*)

Fokus: Fehlermaskierung



- Replikation ist der koordinierte Einsatz redundanter Elemente
- Anordnung in einer „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?
 - Wie behebt man verbliebene kritische Bruchstellen?
 - Was passiert bei Fehler in der Eingabe oder im Ausgangsvergleich?

Wie viele Replikate braucht man?

Unter der Annahme, dass höchstens f Fehler auftreten?

- Zahl benötigter Replikate hängt von der Art des Fehlverhaltens ab [3]

- Annahme: von n Replikaten sind in folgender Weise **f fehlerhaft**

„fail-silent“

→ Anzahl der Replikate $n = f + 1$

- ein Knoten erzeugt **korrekt oder gar keine Antworten**
- führt das Fehlerverhalten zum Stillstand des Knoten → **crash failure**
- für einen Knoten der **einfachste Fehlermodus**
 - werden alle anderen Replikate informiert, ist das ein **fail-stop failure**

„fail-consistent“

→ Anzahl der Replikate $n = 2f + 1$

- ein Knoten kann auch **fehlerhafte Antworten** erzeugen
- alle anderen Knoten sehen **konsistent dasselbe Fehlerverhalten**

„malicious“

→ Anzahl der Replikate $n = 3f + 1$

- „**bösartige**“, fehlerhafte Knoten erzeugen **verschiedene Antworten**
 - die übrigen Knoten haben keine konsistente Sicht auf das Fehlerverhalten
 - ggf. bekommt jedes Replikat eine andere (fehlerhafte?) Antwort
- Synonym: **byzantinische Fehler** (engl. *byzantine failures*)



- Vorabwissen kann helfen, die Zahl der Replikate zu reduzieren
- ☞ hohe Fehlererkennungsrate (engl. *error detection coverage*)
 - das Fehlverhalten wird innerhalb des Knotens erkannt
 - ein Ausbrechen des Fehler ist hier nicht tolerierbar
 - umfasst sowohl Fehlverhalten im Wertebereich ...
 - falsche Eingabewerte oder Berechnungsergebnisse können beispielweise durch Zusicherungen abgefangen werden
 - Durchführung häufig im Rahmen zyklischer Selbsttests
 - als auch Fehlverhalten im Zeitbereich
 - einzelne Aufgaben überschreiten ihre maximale Ausführungszeit
 - „quasselnde Idioten“ (engl. *babbling idiot*) überlasten das Kommunikationssystem durch zeitlich unkoordinierten Nachrichtenversand
- ☞ das korrekte Systemverhalten ist a-priori bekannt
 - und kann genutzt werden, um „fail-silent“-Verhalten zu implementieren
 - zwei Replikate reichen in diesem Fall aus, um einen Fehler zu tolerieren
- ☞ sonst: Mehrheitsentscheid liefert das korrekte Verhalten
 - ☞ hierfür benötigt man dann ein drittes Replikat



- kritische Bruchstellen (engl. *single points of failure*)
 - führen zu einem beobachtbaren Fehlerfall **innerhalb der Fehlerhypothese**
 - kompromittieren also die fehlertolerierende Eigenschaft der SoR
- in der SoR auf Folie VII/10 sind dies **Eingabe und Ausgabe**

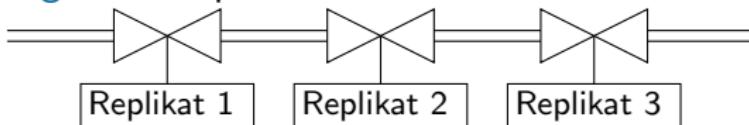


Lösungsmöglichkeiten

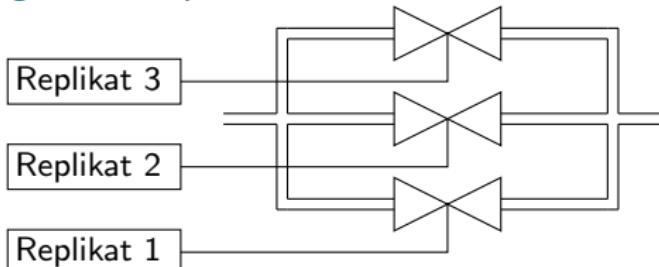
- bestimme Eingabedaten aus **mehreren Sensoren**
 - dies erfordert eine **Einigung der Replikate** über den Eingabewert, allen muss exakt derselbe Wert zugestellt werden
 - Anwendung funktionaler Redundanz → **Sensorfusion** (engl. *sensor fusion*)
- **replizierte den Ausgangsvergleich**
 - erneuter 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 durch z. B. **arithmetische Signaturen**
 - Durchführung des Mehrheitsentscheids durch den **Aktor**



- 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



- Replikate fallen **unabhängig** voneinander aus
 - **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** sind z. B. ...
 - Softwaredefekte und ...
 - das **Übergreifen eines Fehlers** auf andere Replikate

- ☞ einzelne Replikate sind **gegeneinander abzuschotten**
 - ein Dienst, den die SoR zur Verfügung stellt

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 CPU 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 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*)



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



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, ...



Fehlerhypothese (engl. *fault hypothesis*)

Annahmen über das Verhalten einzelner Replikate im Fehlerfall

- in der Praxis betrachtet man für Echtzeitsysteme Replikate, die ...
 - einen transienten Fehler tolerieren können
 - sich „fail-silent“ oder zumindest „fail-consistent“ verhalten
 - unabhängig voneinander ausfallen
 - Gleichtaktfehler müssen also ausgeschlossen werden
 - sich replikdeterministisch verhalten
 - ermöglicht eine einfache Umsetzung des Mehrheitsentscheids
- 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**



1 Überblick

2 Grundlagen

- Fehlertypen
- Redundanz
- Replikation
- Fehlerhypothese

3 Triple Modular Redundancy

4 Process-Level Redundancy

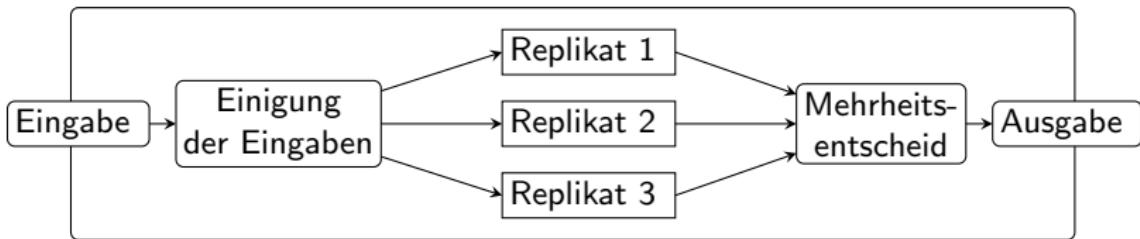
5 Diversität

6 Zusammenfassung



Triple Modular Redundancy (TMR)

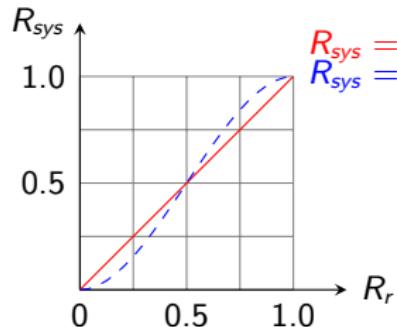
- falls Fehler im Wertebereich nicht zu verhindern sind



- üblicherweise dreifache Replikation kompletter Rechenknoten
 - räumlich redundante Systeme im „hot standby“-Betrieb
 - 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 [5, Kapitel 8] und Replikdeterminismus
- Mehrheitsentscheid (engl. *voter*) stimmt Ausgabewerte ab
 - Vereinigung von Fehlermaskierung und -erkennung

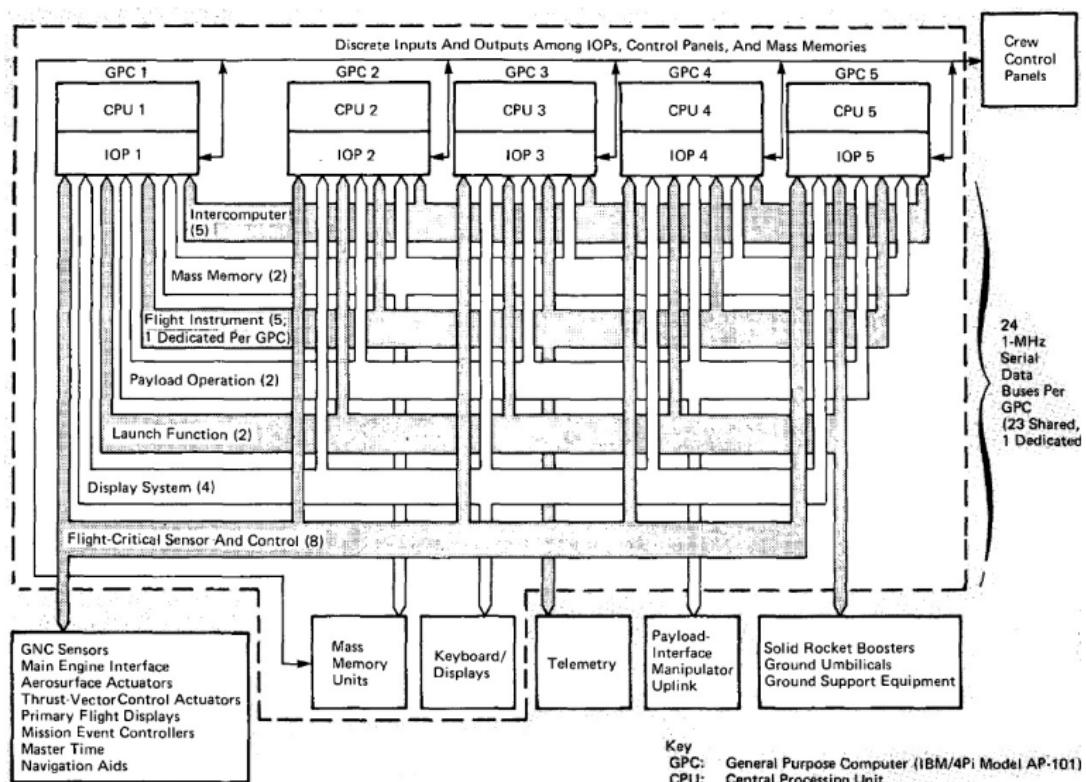


- Erhöht sich durch TMR in jedem Fall die Zuverlässigkeit?
 - anders formuliert: $R_{t_{mr}} > R_r$?
 - $R_{t_{mr}}$ – Zuverlässigkeit des TMR-Verbunds, R_r des einzelnen Replikats
 - der TMR-Verbund arbeitet korrekt, solange ...
 - der Mehrheitsentscheid korrekt funktioniert $\rightsquigarrow R_v$
 - zwei Replikate korrekt funktionieren $\rightsquigarrow R_{2/3} = R_r^3 + 3R_r^2(1 - R_r)$
 - alle drei Replikate arbeiten korrekt oder ...
 - ein Replikat fällt aus, hierfür gibt es drei Möglichkeiten
- insgesamt $R_{t_{mr}} = R_v(R_r^3 + 3R_r^2(1 - R_r)) > R_r$?



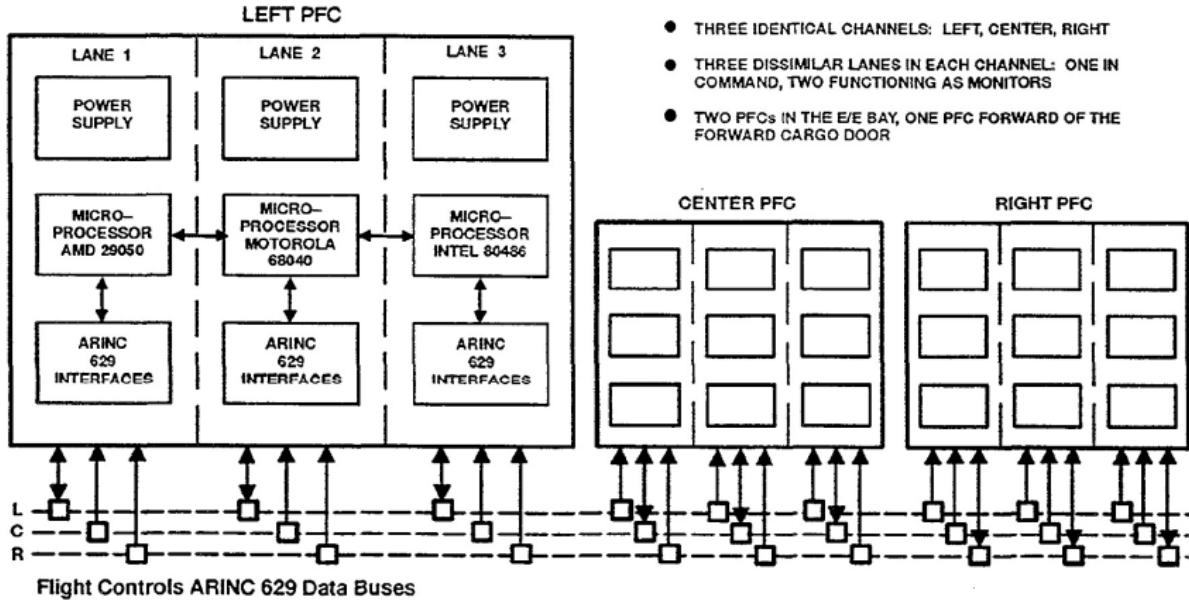
- Annahme: perfekter Voter $R_v = 1$
- TMR ist nur sinnvoll falls $R_r > 0.5$
- Praxis: Voter sollte zuverlässig sein
 - Größenordnung $R_v > 0.9$

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**“
- 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]

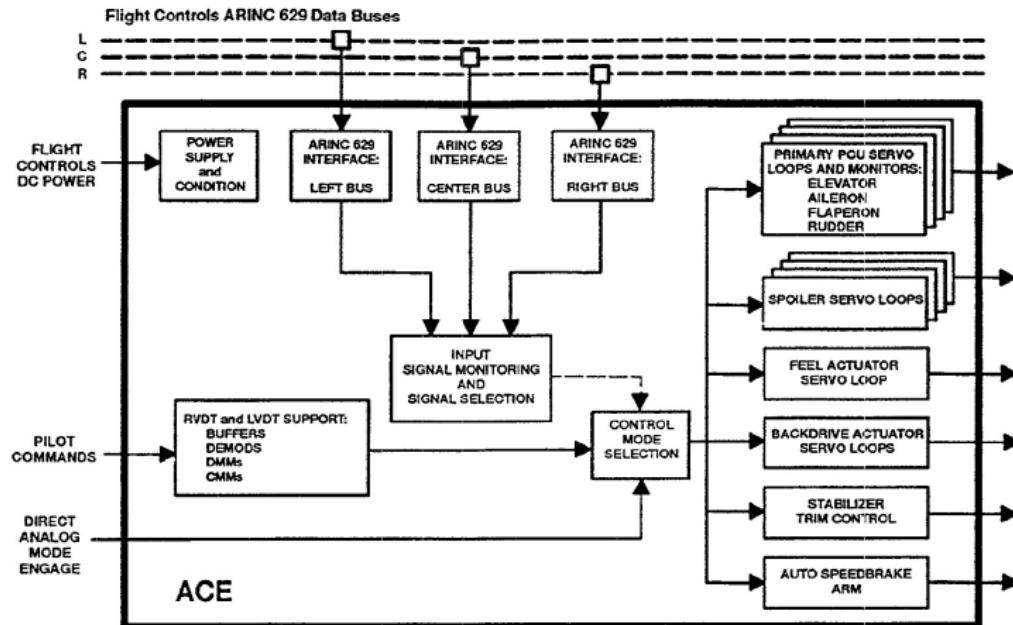


- THREE IDENTICAL CHANNELS: LEFT, CENTER, RIGHT
- THREE DISSIMILAR LANES IN EACH CHANNEL: ONE IN COMMAND, TWO FUNCTIONING AS MONITORS
- TWO PFCs IN THE E/E BAY, ONE PFC FORWARD OF THE FORWARD CARGO DOOR

- 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

1 Überblick

2 Grundlagen

- Fehlertypen
- Redundanz
- Replikation
- Fehlerhypothese

3 Triple Modular Redundancy

4 Process-Level Redundancy

5 Diversität

6 Zusammenfassung



Vorteile von TMR

- sehr hohe Zuverlässigkeit bei richtigem Einsatz

Nachteile von TMR

- 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

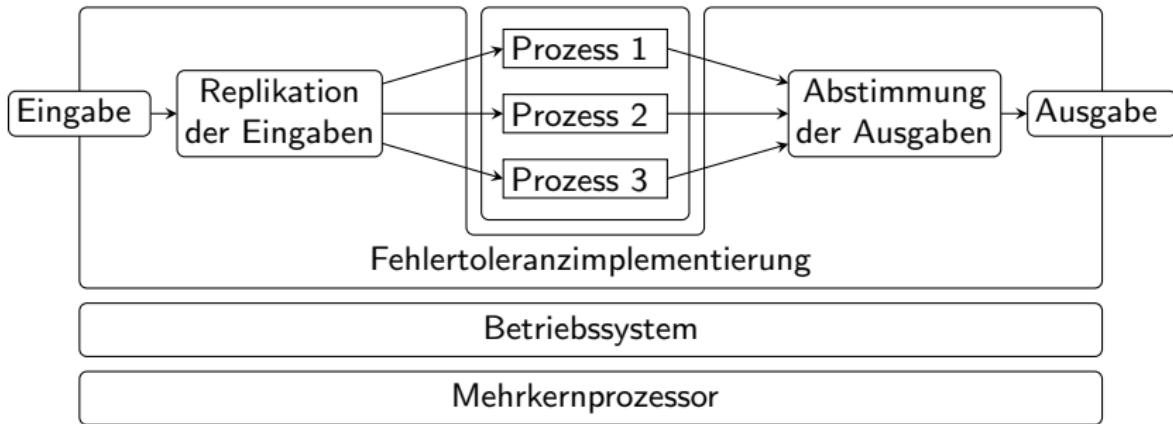


- die höhere Integrationsdichte moderner Hardware könnte uns helfen
 - auch wenn sie andererseits höhere Fehlerraten bedingt
- **Mehr kernprozessoren** „replizieren“ Rechenkerne
 - sie erlauben die Ausführung mehrerer Replikate auf demselben Prozessor



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**



- eine **dedizierte Fehlertoleranzimplementierung** sorgt für
 - die **Replikation der Eingaben** und die **Abstimmung der Ausgaben**
 - und die **zeitliche Isolation** der einzelnen Replikate
- hierfür greift sie auf ein **Betriebssystem** zurück
 - 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
- Emulation der **Systemaufrufschnittstelle**
 - **lesende Systemaufrufe** \sim Replikation der Eingabedaten
 - so findet automatisch eine Einigung über die Eingaben statt
 - **schreibende Systemaufrufe** \sim 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
 - \rightsquigarrow **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
- **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 Überblick

2 Grundlagen

- Fehlertypen
- Redundanz
- Replikation
- Fehlerhypothese

3 Triple Modular Redundancy

4 Process-Level Redundancy

5 Diversität

6 Zusammenfassung



- 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. [3, 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 ...
- **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 VII/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 VII/14



- 1 Überblick
- 2 Grundlagen
 - Fehlertypen
 - Redundanz
 - Replikation
 - Fehlerhypothese
- 3 Triple Modular Redundancy
- 4 Process-Level Redundancy
- 5 Diversität
- 6 Zusammenfassung



Fehlerarten \mapsto Toleranz von SDCs und DUEs

Redundanz \mapsto hat mehrere Dimensionen

- Grundvoraussetzung für Fehlertoleranz
- räumlich, zeitlich, funktional, {hot, warm, cold} standby
- Fehlererkennung, -diagnose, -eindämmung, -maskierung

Replikation \mapsto koordinierter Einsatz von Redundanz

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

Triple Modular Redundancy \mapsto Hardwareredundanz

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

Process Level Redundancy \mapsto „TMR in Software“

- reduziert Kosten von TMR, zulasten eines geringeren Schutzes

Diversität \mapsto 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] KOPETZ, H. :
Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications.
Kluwer Academic Publishers, 1997. –
ISBN 0-7923-9894-7
- [4] MUKHERJEE, S. :
Architecture Design for Soft Errors.
San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2008. –
ISBN 978-0-12-369529-1
- [5] SCHELER, F. :
Echtzeitsysteme.
http://www4.cs.fau.de/Lehre/WS11/V_EZS/, 2011



- [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] 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