Verlässliche Echtzeitsysteme

Redundante Ausführung

Peter Ulbrich

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)

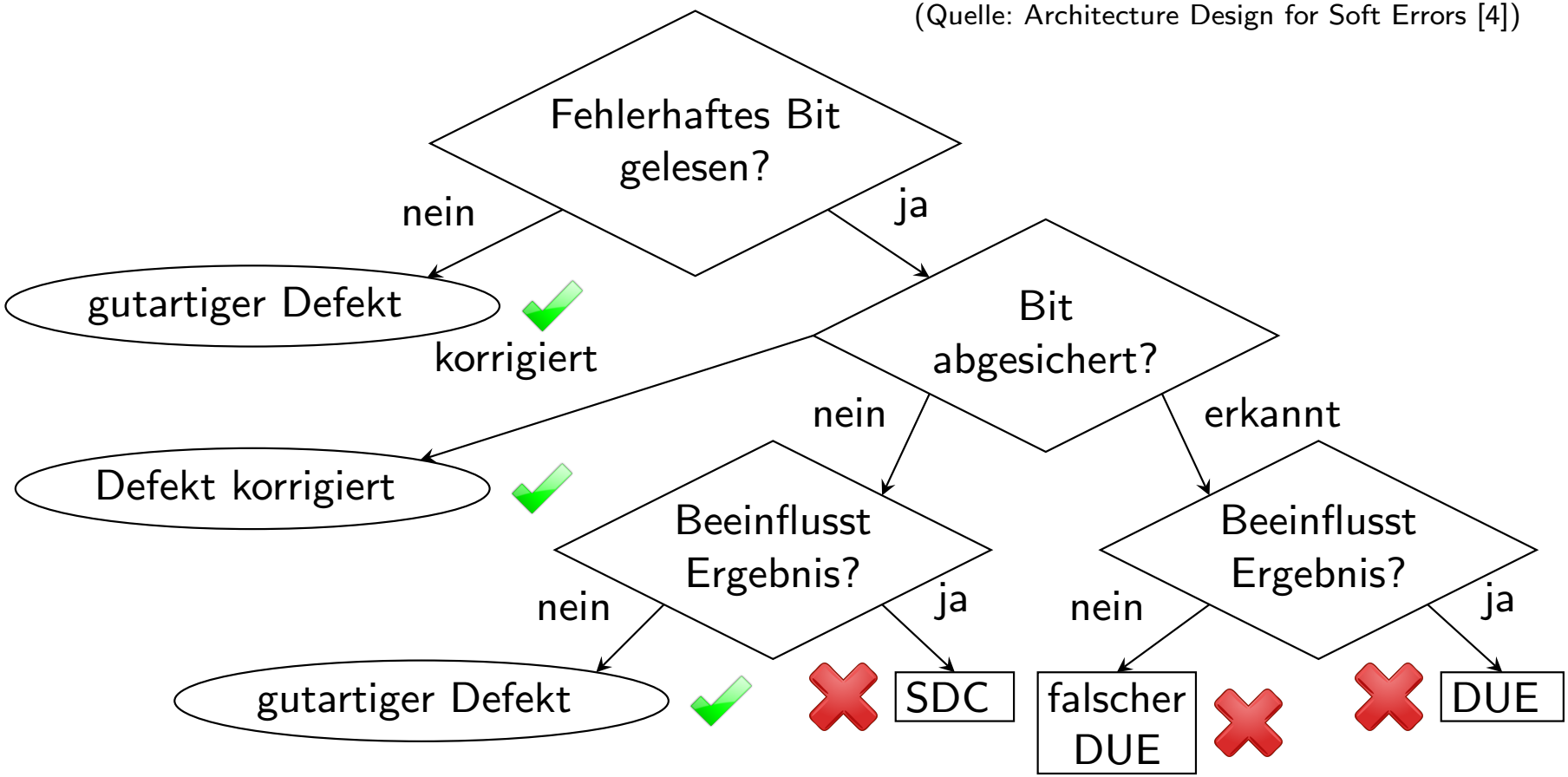
`www4.informatik.uni-erlangen.de`

28. April 2014

Wiederholung – Fehlerarten

- Erinnerung: transiente Fehler (engl. *soft errors*) (s. Folie III/??)
  - treten wie sporadische Fehler unregelmäßig auf ...
  - bewirken kurzzeitige Fehlfunktion $\rightsquigarrow$ Defekt, Fehler, Fehlverhalten
- Datenfehler (SDC) und unkorrigierbare Fehler (DUE, s. Folie III/??)

(Quelle: Architecture Design for Soft Errors [4])



Problem – Fehlervermeidung

- ungehemmte Fehlerfortpflanzung führt zum Systemversagen
  - unerkannte Datenfehler (engl. *silent data corruption*)
    - 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 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)

Redundanz und Fehlertoleranz – Übersicht

Was kann man gegen eine unzuverlässige Hardware tun?

- 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, $n = 2, \ldots$
- 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

Gliederung

Arten von Redundanz

- Redundanz ist eine Grundvoraussetzung für Fehlertoleranz

strukturelle Redundanz

- Replikation $\rightsquigarrow$ hardwarebasierte Fehlertoleranzlösungen (typisch)
- mehrfache Auslegung: Prozessoren, Speicher, Sensoren, Aktoren, ...
- gleichartige Instanzen, agieren häufig simultan

funktionelle Redundanz

- mehrfache Herleitung desselben Sachverhalt auf verschiedenen Wegen
  - Ventilstellung $\rightsquigarrow$ Stellungsgeber bzw. Durchflussmengenmesser
- Funktionswächter (engl. *watchdog*) für bestimmte Parameter

Informationsredundanz

- zusätzliche Informationen (nicht zwingend erforderlich)
- Speicherung von Brutto- und Nettobetrag
- Typischerweise in Form von Codierung (Prüfsummen, CRC, ...)

zeitliche Redundanz

- über den Normalbetrieb hinausgehende Zeit
- z.B. Numerische Algorithmen, Schlupf in einem EZS, ...

Ziel der Redundanz

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

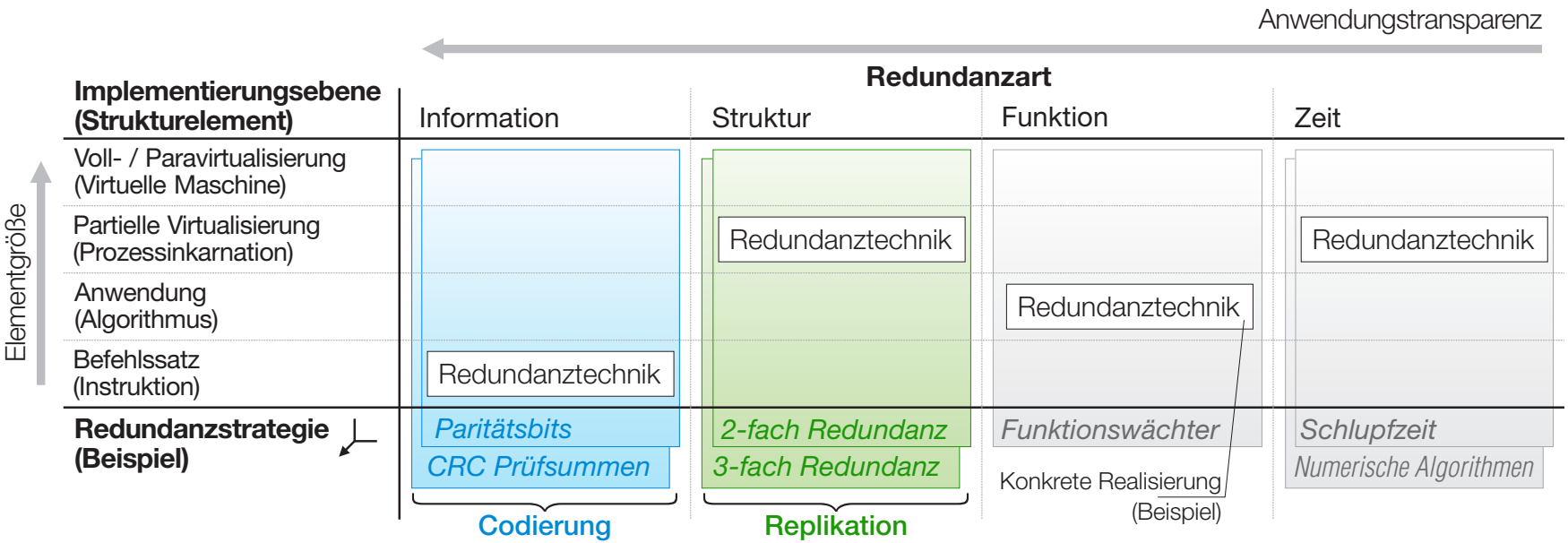
Wiederaufsetzen (engl. *recovery*)

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

Fokus der Vorlesung: Fehlererkennung und Fehlermaskierung

Koordinierter Einsatz von Redundanz

Ein zweites Rechensystem nützt alleine nicht viel!



- Es gibt viele Implementierungsalternativen
- In der Praxis: Mischformen $\rightsquigarrow$ was ermöglicht Fehlererkennung?
- Funktionelle und zeitliche Redundanz erfordern umfangreiches Vorabwissen

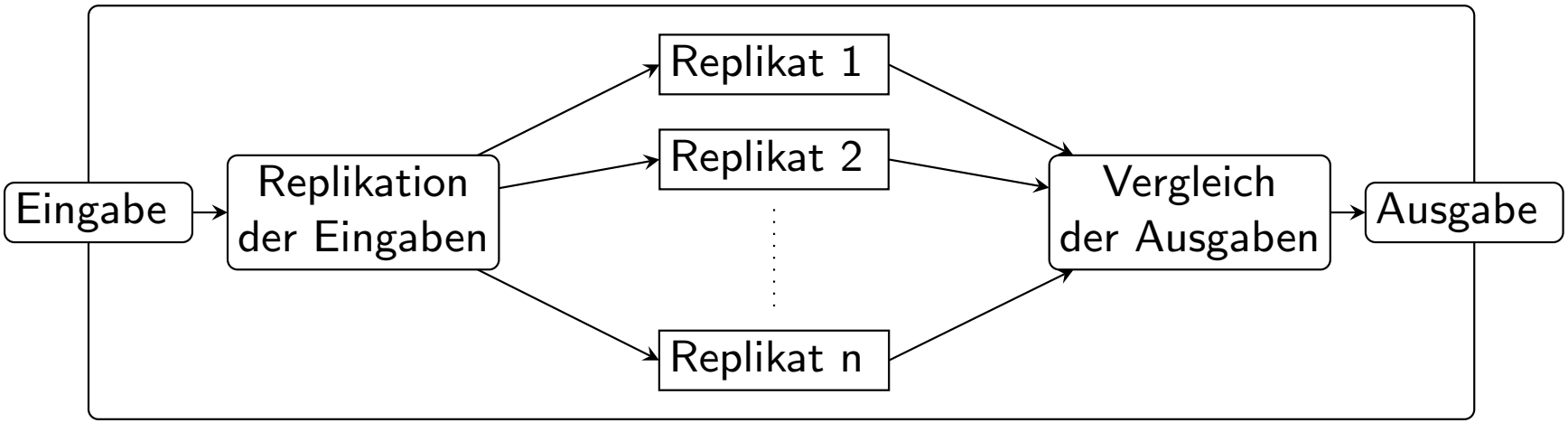
Fokus der Vorlesung: strukturelle und Informationsredundanz

Replikation

- Replikation ist der koordinierte Einsatz struktureller Redundanz

☞ 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?

- Zahl benötigter Replikate hängt von der Art des Fehlverhaltens ab [3]
  - Annahme: von n Replikaten sind in folgender Weise f fehlerhaft

„fail-silent“ $\mapsto$ Anzahl der Replikate $n = f + 1$

  - ein Knoten erzeugt korrekt oder gar keine Antworten
  - das Fehlerverhalten führt zum Stillstand des Knoten

  $\rightsquigarrow$ für einen Knoten der einfachste Fehlermodus
  - Der Ausfall wird von den anderen Replikate als solches erkannt

„fail-consistent“ $\mapsto$ Anzahl der Replikate $n = 2f + 1$

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

„malicious“ $\mapsto$ Anzahl der Replikate $n = 3f + 1$

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

Wie viele Replikate braucht man? (Forts.)

- Vorabwissen und Systemaufbau helfen Replikate einzusparen

☞ hohe Fehlererkennungsrate (engl. *error detection coverage*)

- das Fehlverhalten wird erkannt
  - innerhalb des Replikats oder durch zentrale Prüfinstanz
  - ein Ausbrechen des Fehler ist nicht tolerierbar
- umfasst sowohl Fehlverhalten im Wertebereich . . .
  - falsche Eingabewerte oder Berechnungsergebnisse können beispielweise durch Zusicherungen abgefangen werden
  - Durchführung häufig im Rahmen von Akzeptanztests
- als auch Fehlverhalten im Zeitbereich
  - maximale Antwortzeit der Replikate ist bekannt und durchsetzbar
  - „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

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

Fehlerisolation

- 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 korrumpiert 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 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
  - 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

  $\rightsquigarrow$ unterschiedliche Reihenfolge beobachteter Ereignisse

unterschiedlicher zeitlicher Fortschritt der einzelnen Replikate

- Oszillatoren verschiedener Replikate sind nie exakt gleich

  $\rightsquigarrow$ 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

  $\rightsquigarrow$ 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

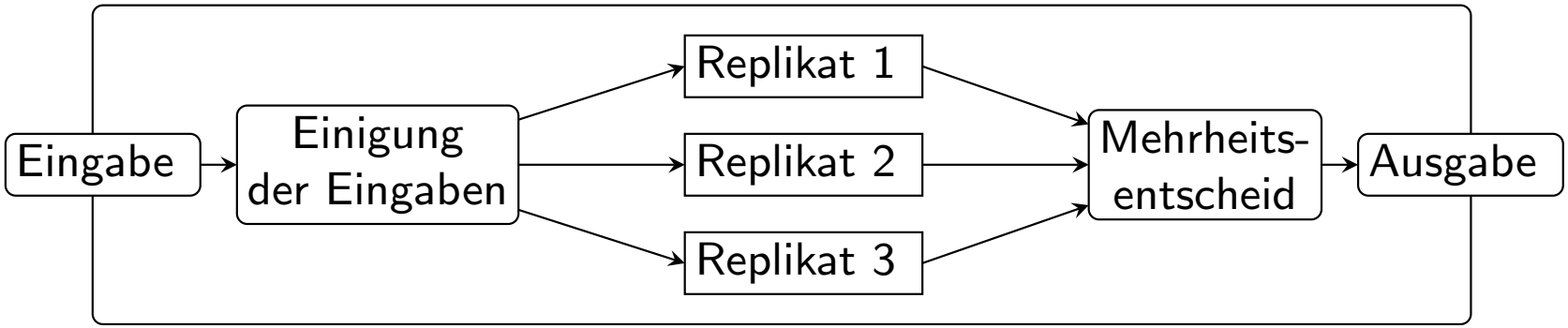
    $\rightsquigarrow$ hohe Kosten, Gewicht, Energieverbrauch
  - Erkennung fehlerhafter Replikate erfordert aufwendige Kommunikation
    - $f + 1$ Kommununikationsrunden für $3f + 1$ Replikate und f Fehler
    - je Runde schickt jedes Replikat eine Nachricht an alle anderen Replikate

    $\rightsquigarrow$ für Echtzeitsysteme ein nicht tolerierbarer zeitlicher Aufwand

Gliederung

Triple Modular Redundancy (TMR)

- falls Fehler im Wertebereich nicht zu verhindern sind



- üblicherweise dreifache Replikation kompletter Rechenknoten
  - räumlich redundante Systeme im „hot standby“-Betrieb

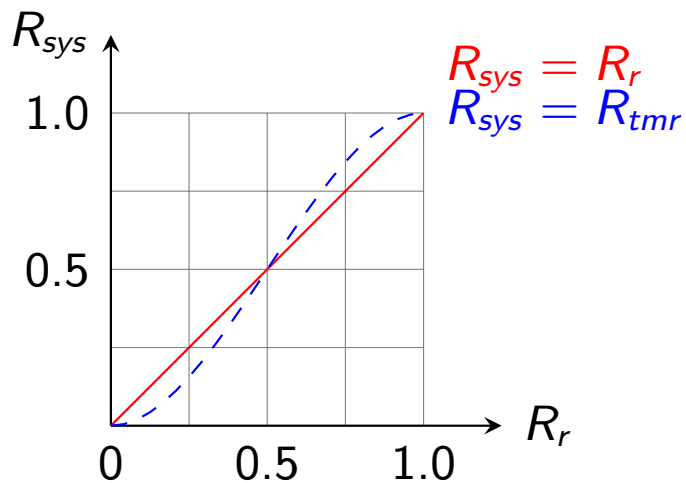
  ⇝ weitgehende räumliche und zeitliche Isolation
- Abstimmung der Eingabewerte zwischen den Replikaten
  - die Replikate verfügen über eine gemeinsame globale Zeitbasis
  - das Kommunikationssystem verhindert die Steuerfehlerausbreitung

  ⇝ vollständige zeitliche Isolation [5, Kapitel 8] und Replikdeterminismus
- Mehrheitsentscheid (engl. *voter*) stimmt Ausgabewerte ab
  - Vereinigung von Fehlermaskierung und -erkennung

Wann hat TMR einen Nutzen?

- Erhöht sich durch TMR in jedem Fall die Zuverlässigkeit?
  - anders formuliert: $R_{tmr} > R_r$?
    - R_{tmr} – 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

$\rightsquigarrow$ insgesamt $R_{tmr} = R_v(R_r^3 + 3R_r^2(1 - R_r)) > R_r$?



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

Verbliebene kritische Bruchstellen

- 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 IV/9 sind dies Eingabe und Ausgabe

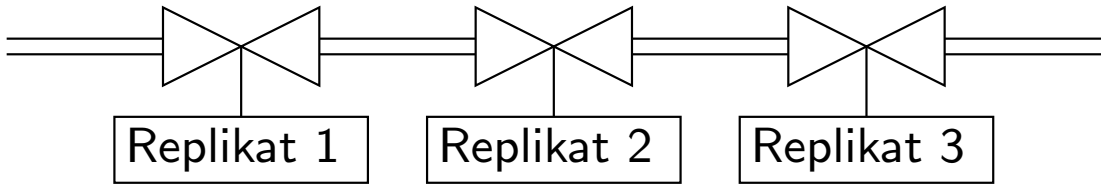
☞ Lösungsmöglichkeiten
  - bestimme Eingabedaten aus mehreren Sensoren
    - dies erfordert eine Einigung der Replikate über den Eingabewert, allen muss exakt derselbe Wert zugestellt werden
    - Anwendung funktionaler Redundanz ⇝ Sensorfusion (engl. *sensor fusion*)
  - repliziere den Ausgangsvergleich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

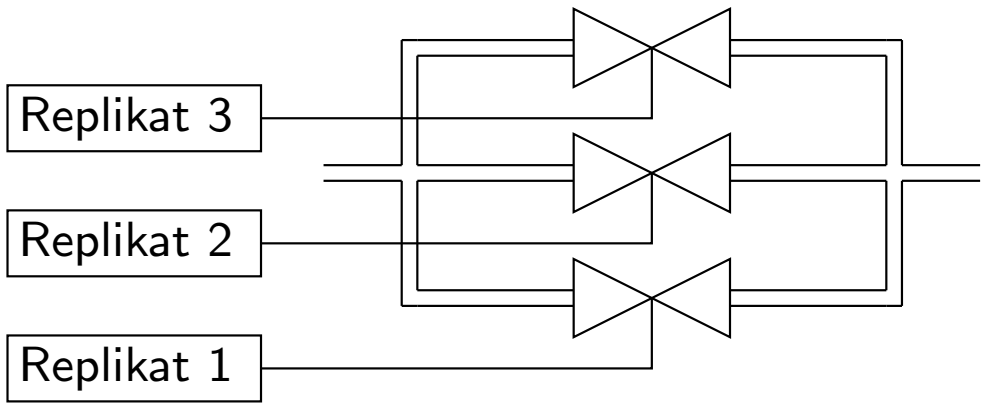
Mehrheitsentscheid am Aktor

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

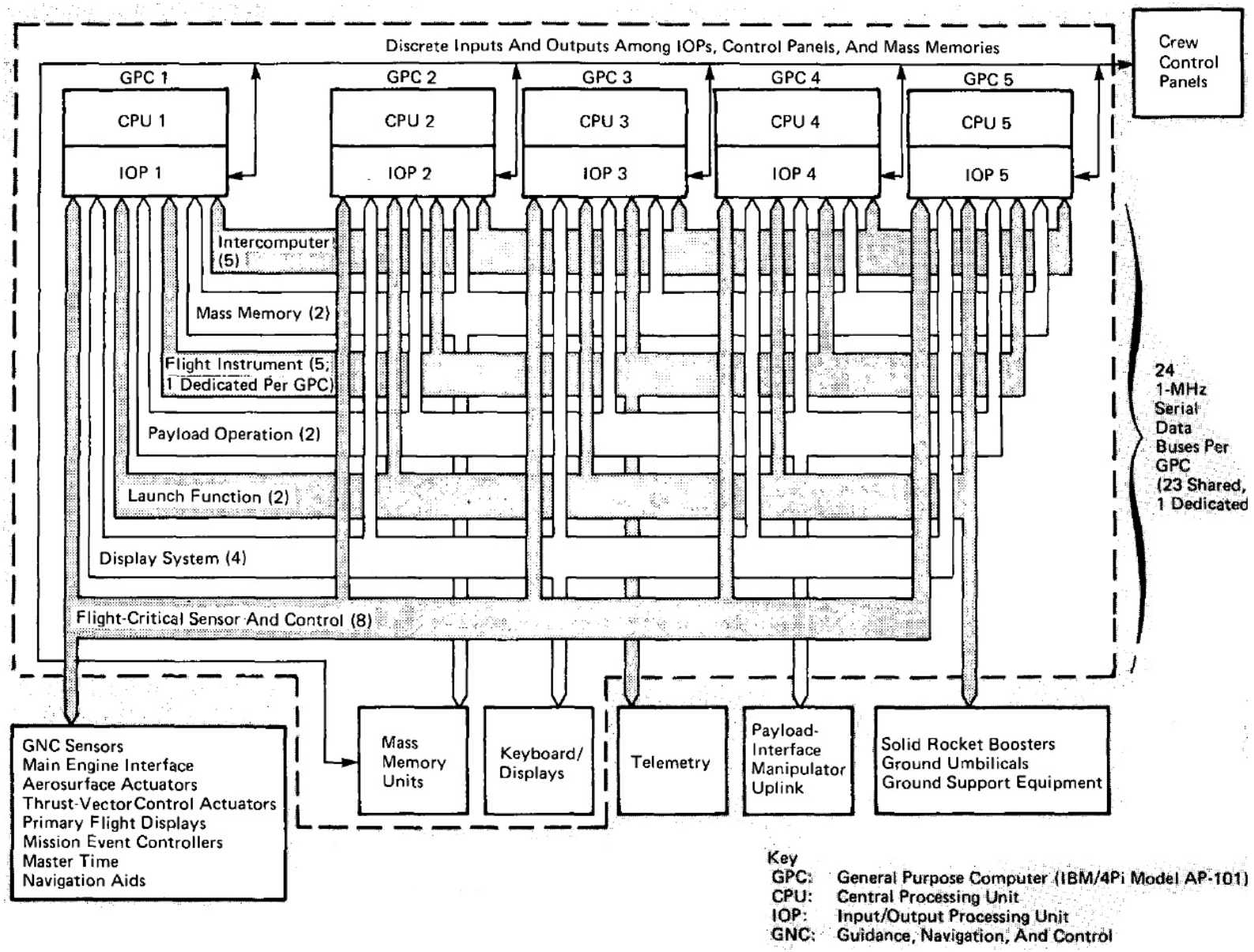


  - um den Fluss zu stoppen, genügt ein korrektes Replikat
- Parallelschaltung von Absperrventilen



  - um den Fluss zu ermöglichen, genügt ein korrektes Replikat

Beispiel: Steuerung des Space Shuttle [2]

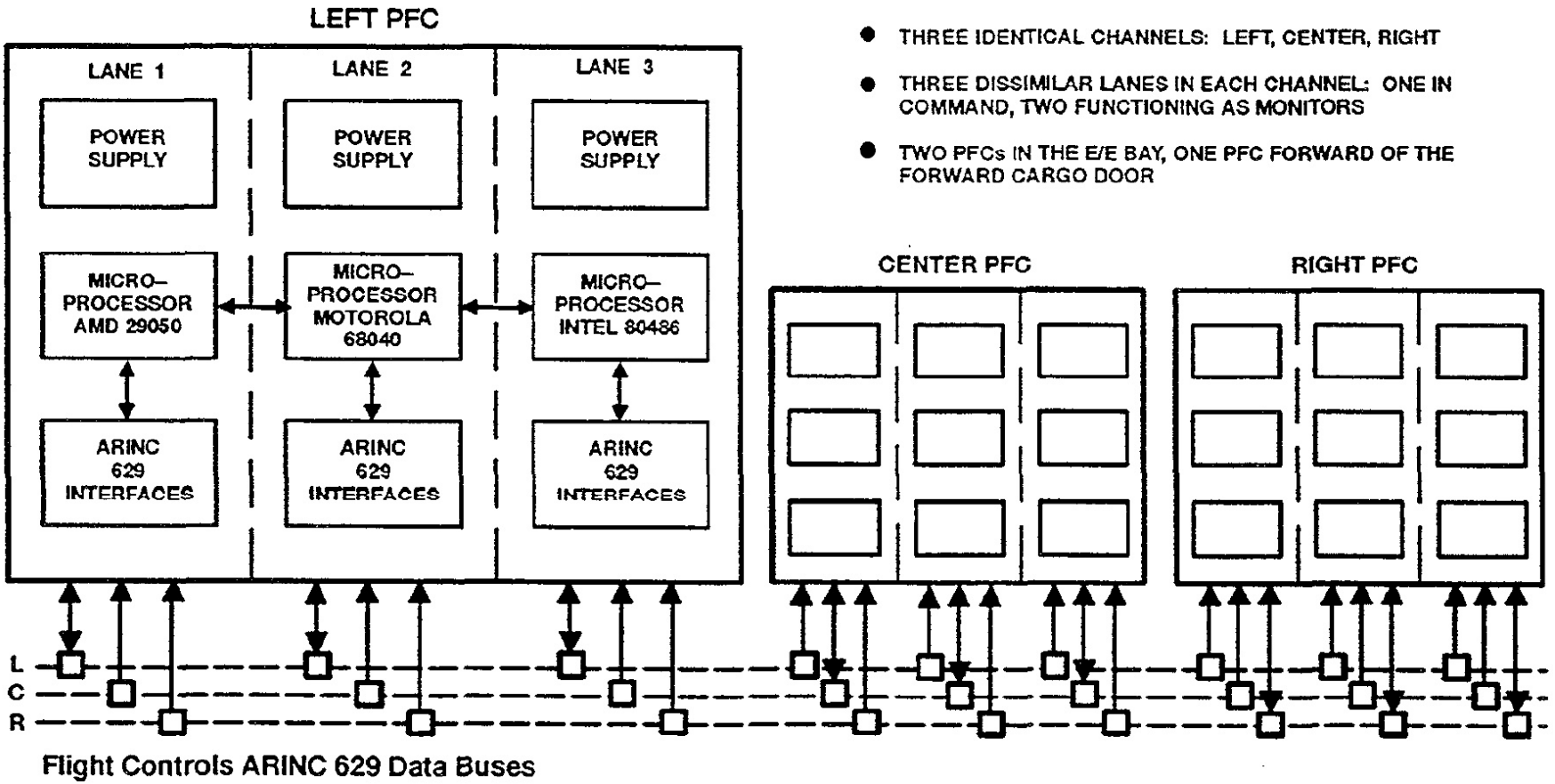


Beispiel: Steuerung des Space Shuttle (Forts.)

- 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 $\rightsquigarrow$ Reduktion auf vier Systeme
    - dies bedeutet fail-operational/fail-safe
    - das fünfte System war aber bereits überall eingeplant

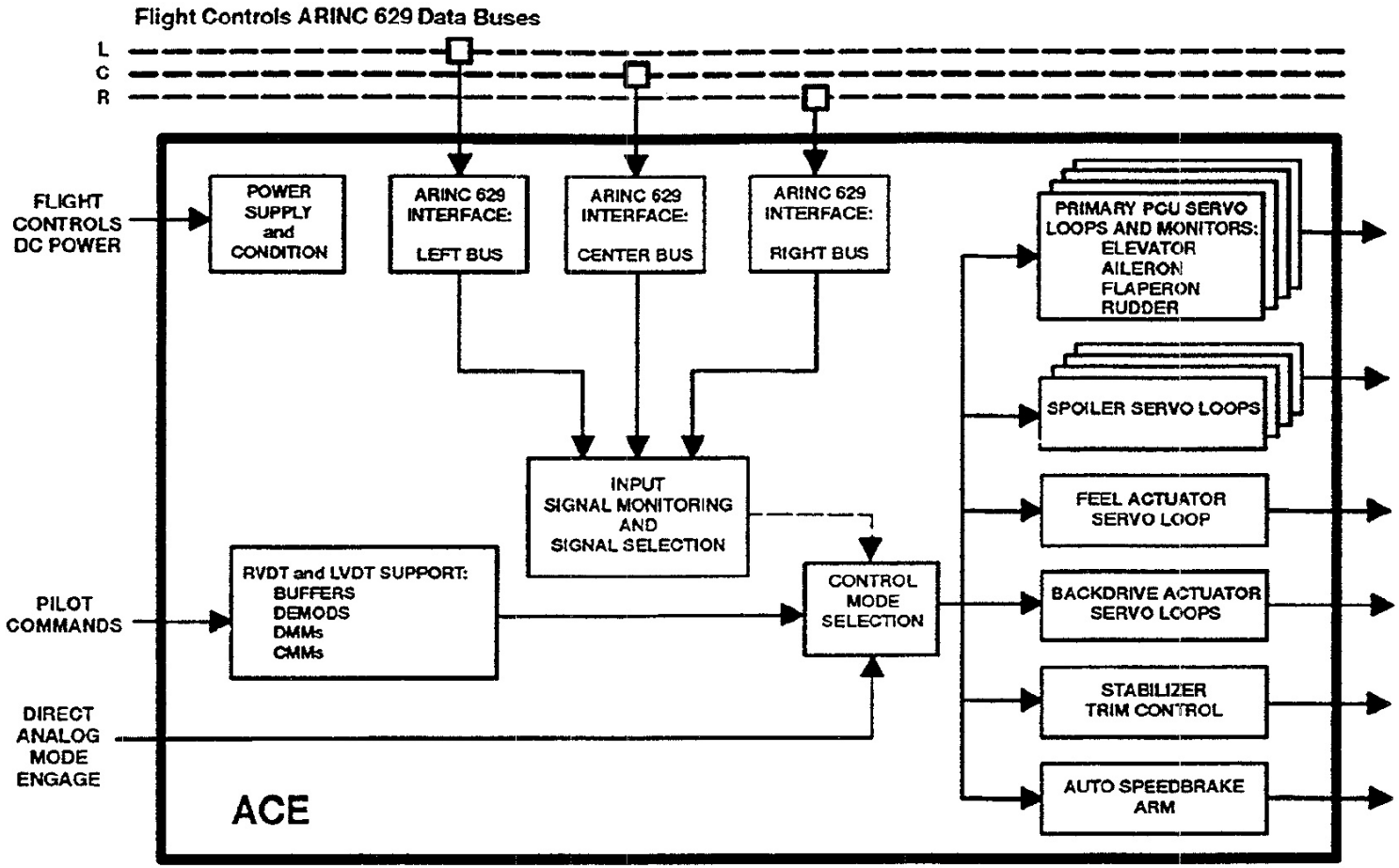
    $\rightsquigarrow$ es wurde zu einem Backup-System „degradiert“ $\rightsquigarrow$ „cold standby“
- unterschiedliche Konfiguration der Rechner je nach Missionsabschnitt
  - TMR nur im Steigflug bzw. Sinkflug
    - drei Systeme laufen simultan im „hot standby“-Betrieb
    - das vierte System läuft im „warm standby“
    - das fünfte System ist das Backup $\rightsquigarrow$ „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 $\rightsquigarrow$ „cold standby“

Beispiel: Steuerung des Boeing 777 [7]



- 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

Gliederung

Vorteile und Nachteile von TMR

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

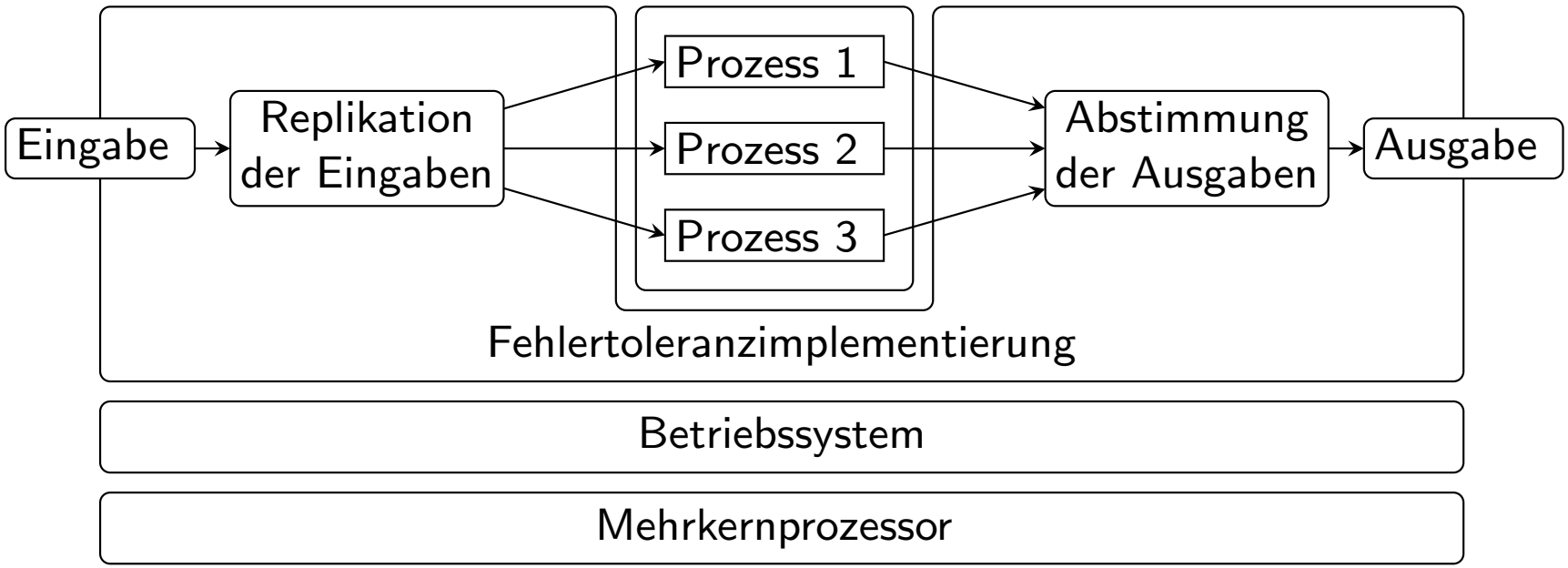
- auch wenn sie andererseits höhere Fehlerraten bedingt

⇝ 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



  - 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

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 Systemaufrufschnittstelle
  - 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 Ablaufen 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

$\rightsquigarrow$ 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

Beispiel: Ariane 5

- 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 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 IV/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 IV/23

Gliederung

Zusammenfassung

Fehlertypen $\mapsto$ Toleranz von SDCs und DUEs

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

Triple Modular Redundancy $\mapsto$ Hardwareredundanz

- dreifache Auslegung, toleriert Fehler im Wertbereich
- 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

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] 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