Verlässliche Echtzeitsysteme

Reintegration fehlgeschlagener Knoten

Peter Ulbrich

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

19./26. Mai 2014

Fragestellungen

- Was passiert eigentlich nach einem transienten Fehler?
  - Welchen Einfluss hat der Fehler auf das betroffene Replikat?
  - Was bedeutet dies für die Fähigkeit des Systems Fehler zu tolerieren?
- Grundlagen der Reintegration fehlgeschlagener Knoten
  - Welche Varianten gibt es hier?
    - Und welche hiervon eignen sich für Echtzeitsysteme?
  - Wie kann man ein Replikat von einem Fehler erholen?
- zwei Varianten der Fehlererholung
  - Eigenständige Fehlererholung durch „Recovery Blocks"
    - der Fehler wird durch das Replikat selbst korrigiert
  - Zustandstransfer von einem funktionsfähigen Replikat
    - um eine korrumpierte Datenbasis zu reparieren

Gliederung

1 Überblick

2 Grundlagen
- Vorgehen bei der Reintegration
- Fehlererholung
- Interner Zustand

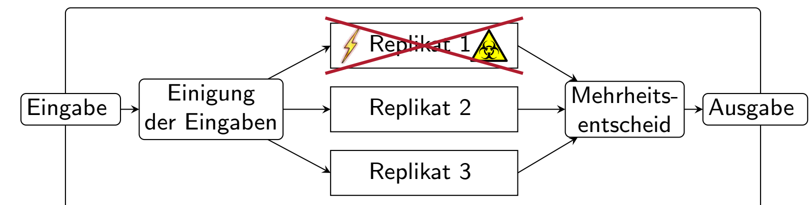
3 Zustandstransfer

4 Rückwärtskorrektur durch Entwurfsalternativen

5 Zusammenfassung

Problembeschreibung

Ein Fehler wird kompensiert, aber was passiert dann?



Normalbetrieb alle Replikate arbeiten
- Redundanz und Fehlertoleranz sind in vollem Umfang gegeben

Fehlerfall ein Replikat erleidet einen transienten Fehler
- ⇝ der interne Zustand wird dadurch korrumpiert
- ⇝ das Replikat fällt aus ...

dies bedeutet eine Reduktion der Fähigkeit Fehler zu tolerieren
- nur noch zwei funktionsfähige Replikate ⇝ das System ist verwundbar

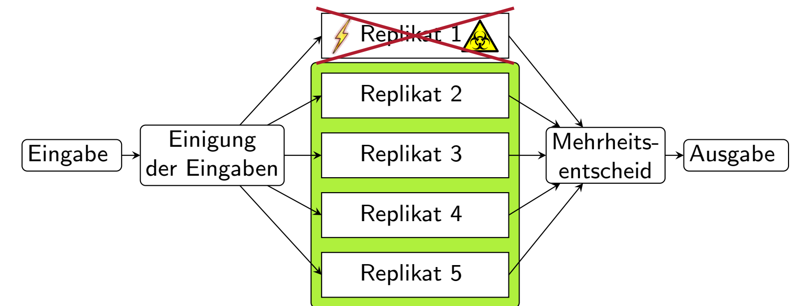
⇝ Replikat 1 muss sich erholen und reintegriert werden

Reintegration fehlgeschlagener Knoten

Wie geht man grundsätzlich mit dem Ausfall eines Knotens um?

1. Fehlererkennung ↦ Ist ein Fehler aufgetreten?
   - zu Beginn steht die Erkennung, dass ein Replikat fehlerhaft ist
     - dies kann durch den Mehrheitsentscheid erfolgen, oder
     - das fehlerhafte Replikat teilt dies selbst mit (s. Folie ??, crash failure)
2. Fehlerdiagnose ↦ Wo ist der Fehler aufgetreten?
   - Welches Replikat ist ausgefallen?
3. Rekonfiguration ↦ Das fehlerhafte Replikat „aussperren".
   - das fehlerhafte Replikat darf nicht mehr am Betrieb teilnehmen
   - ggf. wird das Replikat durch ein Backup-System ersetzt
     - so wird die volle Fähigkeit Fehler zu tolerieren schnell wiederhergestellt
4. Fehlererholung ↦ Den Fehler beseitigen.
   - Kann der Fehler behoben werden, oder liegt ein permanenter Fehler vor?
     - Umsetzung durch einen Selbsttest, den das Replikat durchführt.
5. Reintegration ↦ Den Ursprungszustand wiederherstellen.
   - das Replikat wird erneut in den Verbund aufgenommen

Beispiel: Space Shuttle [3]



- Replikate {1,2,3,4} arbeiten in einem 4-fach redundanten Verbund
  - Replikat 5 ist das Backup-System
- ☞ Replikat 1 fällt nun aufgrund eines transienten Fehlers aus
  - zunächst wird Replikat 1 aus dem Verbund ausgeschlossen
  - dann wird Replikat 5 in den Verbund aufgenommen
    - um die Fähigkeit zur Fehlertoleranz wieder vollkommen herzustellen
  - schließlich bleibt noch Replikat 1 zu erholen und neu zu integrieren

Reaktiv vs. Proaktiv

reaktive Fehlererholung ⇝ nachdem der Fehler aufgetreten ist

- setzt die Erkennung des Fehlers voraus
- anschließend wird die Fehlersituation repariert
  - ein Wiederholungsversuch (engl. *retry*) wird unternommen
  - es wird zu einem Sicherungspunkt (engl. *checkpoint*) zurückgekehrt

proaktive/reaktive Fehlererholung ⇝ Vorbereitungen treffen

- proaktive Maßnahmen bereiten eine reaktive Fehlererholung vor
  - das regelmäßige Erstellen von Sicherungspunkten ist proaktiv
  - deren Wiederherstellung im Fehlerfall hingegen reaktiv

proaktive Fehlererholung ⇝ Vermeidung von Fehlersituationen

- vorsorglich durchgeführte Maßnahmen, die
  - regelmäßig zu festen Zeitpunkten, oder
  - als Reaktion auf die Veränderung bestimmter Indikatoren stattfinden
    - wenn ein Leistungsabfall (z. B. mittleren Antwortzeit) beobachtbar ist
- sie umfassen z. B. regelmäßige Neustarts, leeren von Puffern, ...

Vorwärts- vs. Rückwartskorrektur

Rückwärtskorrektur (engl. *roll backward, backward error recovery*)

- Rückkehr zu einem Sicherungspunkt im Fehlerfall
  - ⇝ der Sicherungspunkt muss entsprechend vertrauenswürdig sein
- Bearbeitung muss komplett umkehrbar sein
  - ⇝ keine nicht-zurücknehmbaren Aktionen (engl. *irrevocable actions*)
  - ⇝ ansonsten wäre eine Rückkehr zum Sicherungspunkt unmöglich
- Dauer der Fehlererholung hängt von folgenden Faktoren ab
  - Größe bzw. Umfang des Sicherungspunkts
    - Wie viele Daten müssen kopiert werden? Wie lange dauert dies?
  - Alter des Sicherungspunkts
    - evtl. müssen verpasste Anfragen nachgeholt werden (engl. *audit trail*)
  - ⇝ für Echtzeitsysteme häufig zu langwierig

Vorwärtskorrektur (engl. *roll forward, forward error recovery*)

- kommt ohne Rückgriff auf vorher gesicherten Zustand aus
  - ⇝ die bevorzugte Variante für Echtzeitsysteme
    - Zustand wird in jedem Zyklus neu erfasst ⇝ Maskierung alter Werte
    - kurze Fehlererholung ⇝ im Idealfall durch den Normalbetrieb

Interner Zustand eines Replikats [5, Kapitel 4]

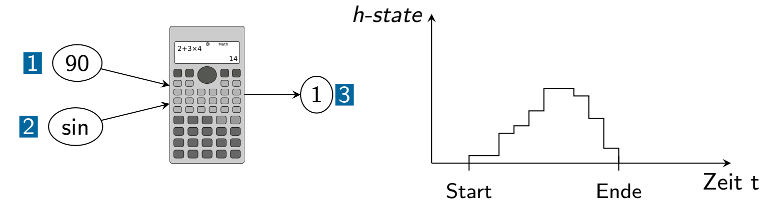
- zwei Teile sind maßgeblich für den Zustand eines Replikats

Initialzustand (engl. *initialization state, i-state*)
- statische, zur Laufzeit unveränderliche Datenstruktur
  - umfasst z. B. den Programmcode und Initialisierungsdaten
  - auch zur Laufzeit konstante Daten zählen hierzu
- ⇝ Ablage im nicht-schreibbaren Speicher (engl. *read-only memory, ROM*)

dynamischer Zustand (engl. *history state, h-state*)
- zur Laufzeit veränderliche Daten
  - beinhalten Informationen zum Fortschritt einer Berechnung
  - ⇝ ist bei der Reintegration ausgefallener Replikate zu restaurieren
- ⇝ Ablage im schreibbaren Speicher (engl. *random-access memory, RAM*)

Beispiel: Dynamischer Zustand eines Taschenrechners

- Verwendung eines Taschenrechners
  - Eingabe der Operanden und Operatoren ⇝ Ergebnis
  - der dynamische Zustand ist zu Beginn und am Ende der Berechnung leer
    - immer, wenn man Berechnungen als unteilbar (engl. *atomic*) betrachtet



- angenommen die Sinus-Funktion wird iterativ approximiert
  - ⇝ der Taschenrechner verwaltet Zustandsvariablen für diese Berechnung
  - ⇝ diese Zustandsvariablen sind für die Berechnung unersetzlich
    - ihr Transfer ist erforderlich, soll die Berechnung anderswo fortgesetzt werden
- weiteres Beispiel: Summation mehrerer Summanden
  - Zwischenergebnisse ⇝ dynamischer Zustand der Summation

Minimierung des dynamischen Zustands

- der dynamische Zustand einer Berechnung ist für ihre Fortführung auf einem anderen Replikat zwingend erforderlich
  - die Reintegration eines Replikats erfordert seine Restauration
    - was letztendlich zu einem Zustandstransfer zwischen den Replikaten führt
- ⇝ für eine schnelle Fehlererholung sollte er so klein wie möglich sein
- ⇝ aus dem Taschenrechner-Beispiel wird klar:
  - dies ist der Fall, wenn keine Berechnung aktiv ist

☞ zu bevorzugen ist der Grundzustand (engl. *ground state*)
- systemweit ist keine Berechnung aktiv, alle Nachrichtenkanäle sind leer
  - der dynamische Zustand ist im Grundzustand demnach am kleinsten
- ⇝ der Grundzustand ist für die Reintegration besonders geeignet
- ⇝ der Grundzustand sollte regelmäßig eingenommen werden
  - eine zyklische Ablaufstruktur (s. Folie IV/S.**??**) unterstützt dies
  - nach jedem Zyklus „lesen, rechnen, schreiben" wäre dies möglich

Erreichbarkeit des Grundzustands

- die Einplanungsstrategie hat hier einen signifikanten Einfluss
  - ereignisgesteuerte Einplanung:

Task A
Task B
Task C

  - zeitlicher Ablauf hängt vom Eintreffen der Ereignisse ab
  - ⇝ das Erreichen des Grundzustands kann nicht garantiert werden
- zeitgesteuerte Einplanung:

Grundzustand
Task A
Task B
Task C

  - zyklensynchrone Ausführung erlaubt die Einplanung des Grundzustands
  - für Replikdeterminismus (s. Folie **??**) ist dies ohnehin sinnvoll

Bestandteile des dynamischen Zustands

- der dynamische Zustand lässt sich weiter aufteilen:

Zustand des physikalischen Objekts

- kann durch Sensoren erneut erfasst werden
  - das Replikat wird hier mit der physikalischen Umwelt synchronisiert
- ⇝ zur Restauration kein Transfer erforderlich

Standardausgaben (engl. *restart vector*)

- sichere Ausgabewerte für das kontrollierte Objekt
  - sie werden für die „Initialisierung" von Aktoren etc. verwendet
  - sind i. d. R. bereits zum Entwurfszeitpunkt festlegbar
- ⇝ zur Restauration kein Transfer erforderlich

sonstiger dynamischer Zustand

- „der Rest", gehört entsprechend nicht zu den obigen Kategorien
- ⇝ zur Restauration ist ein Transfer notwendig
  - kann durch eine Überarbeitung des Systementwurfs evtl. reduziert werden
  - ⇝ z. B. indem ein zusätzlicher Sensor zum Einsatz kommt

Gliederung

1 Überblick

2 Grundlagen
- Vorgehen bei der Reintegration
- Fehlererholung
- Interner Zustand

3 Zustandstransfer

4 Rückwärtskorrektur durch Entwurfsalternativen

5 Zusammenfassung

Zustandstransfer

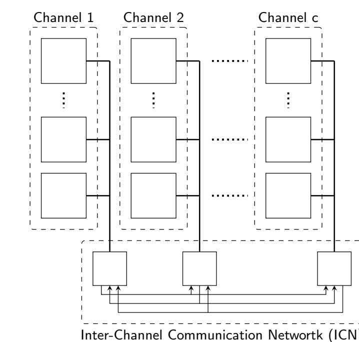
- dynamischer Zustand ⇝ Zustandsabgleich (engl. *state alignment*)
  - vorher kann das fehlgeschlagene Replikat nicht integriert werden
  - auch als Zustandsrestaurierung (engl. *state restoration, SR*) bekannt
- idealerweise gelingt dies in „einem Rutsch" (engl. *one-shot SR*)
  - entweder ist der zu restaurierende Zustand hinreichend klein ...
    - das ist abhängig von der konkreten Anwendung
  - ... oder das System kann zu diesem Zweck angehalten werden
    - dies ist in sicherheitskritischen Echtzeitsysteme i. d. R. nicht möglich

normalerweise muss der Abgleich im laufenden Betrieb erfolgen [2]

- Echtzeitanforderungen verbieten i. d. R. das Anhalten des Systems
  - allenfalls ein reduzierter Betriebsmodus (engl. *degraded mode*) ist denkbar
  - dieser räumt dem Zustandsabgleich mehr Ressourcen ein
  - ohne jedoch die Ausführung kritischer Aufgaben zu gefährden
- im Folgenden zwei Modi für den Zustandsabgleich:
  - „Running SR" (s. Folie VII/18) und „Recursive SR" (s. Folie VII/21)

Systemstruktur – GUARDS [6]

Generic Upgradeable Architecture for Real-time Dependable Systems



- Grundbaustein: redundante Kanäle (engl. *channel*) ≈ Replikate
  - Kanäle sind fehlereingrenzende Sicherheitshüllen (engl. *fault containment*)
  - ein Kanal besteht aus mehreren Rechenknoten
    - agieren als Mehrprozessorsystem mit gemeinsamen Speicher
    - dynamische Ablaufplanung auf den einzelnen Knoten
- verfügen über ein gemeinsames Kommunikationssystem ↦ ICN
  - statische, zyklische Kommunikation, Uhrensynchronisation

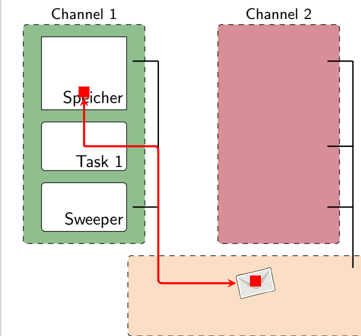
Grundsätzlicher Ablauf des Zustandsabgleichs

- ein GUARDS-System umfasse C redundante Kanäle
  - der Zustand einer dieser Kanäle muss restauriert werden
  - ⇝ die verbleibenden $C - 1$ Kanäle sind die Lieferanten des Zustands

1. das System nimmt den Modus „SR Mode“ ein
   - ggf. wird hierfür die Leistung des Normalbetriebs reduziert
     - kritische Aufgaben werden weiterhin abgearbeitet
2. aktive Kanäle gehen in den Zustand „put state“ ↦ Lieferung
   - hierfür wird eine zusätzliche Aufgabe, der „Sweeper“ eingeplant
     - wickelt den Speichertransfer zum ausgefallenen Kanal ab
     - teilt sich die Ressourcen mit der verbliebenen Anwendung
3. ausgefallener Kanal geht in den Zustand „get state“ ↦ Annahme
   - hierfür wird eine zusätzliche Aufgabe, der „Catcher“ eingeplant
     - nimmt die über das ICN „gelieferten“ Datenpakete an und verarbeitet sie
     - läuft exklusiv als einzige Aufgabe im ausgefallenen Kanal
4. Zustandsabgleich endet am Ende eines ICN-Zyklus
   - im nächsten Zyklus setzt die normale Ablaufplanung ein
   - ⇝ Transfers müssen im selben Zyklus gestartet und vollendet werden

„Running State Restoration“

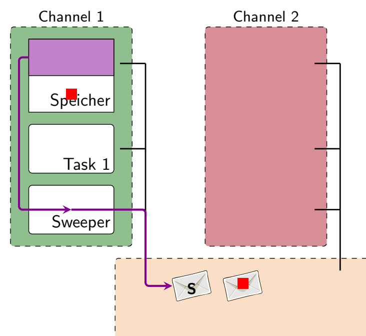
Exemplarisch für ein zweikanaliges System



- Speichermodifikation während des Abgleichs ist möglich
  - Mitteilung der Änderungen per ICN

„Running State Restoration“

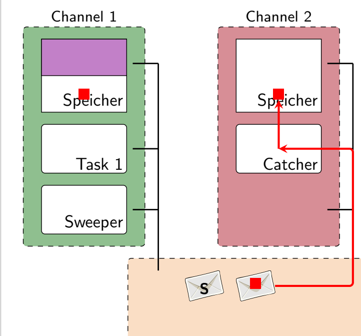
Exemplarisch für ein zweikanaliges System



- Speichermodifikation während des Abgleichs ist möglich
  - Mitteilung der Änderungen per ICN
- Sweeper übernimmt den Rest
  - Versand ebenfalls per ICN

„Running State Restoration“

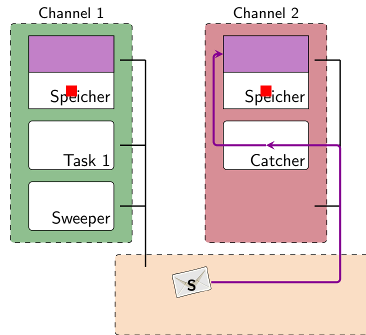
Exemplarisch für ein zweikanaliges System



- Speichermodifikation während des Abgleichs ist möglich
  - Mitteilung der Änderungen per ICN
- Sweeper übernimmt den Rest
  - Versand ebenfalls per ICN
- Catcher nimmt Nachrichten an
  - aktualisiert den Speicher

„Running State Restoration“

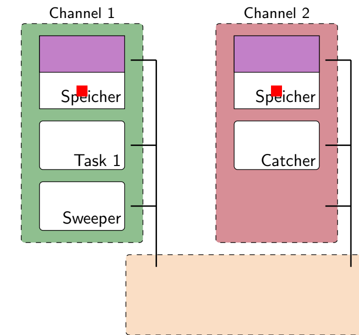
Exemplarisch für ein zweikanaliges System



- Speichermodifikation während des Abgleichs ist möglich
  - Mitteilung der Änderungen per ICN
- Sweeper übernimmt den Rest
  - Versand ebenfalls per ICN
- Catcher nimmt Nachrichten an
  - aktualisiert den Speicher
  - Reihenfolge muss beachtet werden!

„Running State Restoration“

Exemplarisch für ein zweikanaliges System



- Speichermodifikation während des Abgleichs ist möglich
  - Mitteilung der Änderungen per ICN
- Sweeper übernimmt den Rest
  - Versand ebenfalls per ICN
- Catcher nimmt Nachrichten an
  - aktualisiert den Speicher
  - Reihenfolge muss beachtet werden!

- der Abgleich endet deterministisch nach endlich vielen ICN-Zyklen
  - solange genügen Bandbreite vorhanden ist
  - so dass der „Sweeper“ mindestens ein Byte/Zyklus kopieren kann

hohe Anforderung an das Kommunikationssystem
  - mehrere Klienten müssen gleichzeitig bedient werden
    - laufende Anwendungen, der „Sweeper“, kontinuierliche Aktualisierungen

„Running State Restoration“ – Achtung!

- kont. Aktualisierung $\mapsto$ Speicherzugriff & Nachrichtenversand

$\leadsto$ unteilbare Ausführung nötig $\mapsto$ Konsistenz der Speicherstelle wahren

☞ Reihenfolge der Speichertransfers ist wichtig!

„Catcher“ $\leadsto$ trivial
  - Nachrichten werden in Ankunftsreihenfolge verarbeitet

„Sweeper“ $\leadsto$ schwierig
  - Nachrichten müssen in richtigen Reigenfolge ans ICN übergeben werden
  - $\leadsto$ Aufgaben und der „Sweeper“ müssen am ICN ausgerichtet werden
  - $\leadsto$ Beeinflussung der Ablaufplanung durch gezielte Terminvergabe

- mögliche Implementierung:
  - für den „Sweeper“ wird Platz am Ende des ICN-Zyklus reserviert
  - der „Sweeper“ wird nach allen anderen Aufgaben eingeplant
  - $\leadsto$ keine „überlappenden“ Zustandstransfers
    - der „Catcher“ muss nur den Zyklus n beenden, bevor er mit $n+1$ startet

„Running State Restoration“ – Achtung! (Forts.)

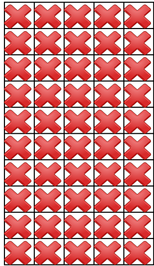
- mehrere Kanäle ermöglichen eine Verbesserung des Abgleichs

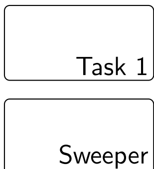
☞ Beschleunigung durch parallele Zustandstransfers
  - Segmentierung des abzugleichende Speichers
    - jeder funktionsfähige Kanal gleicht einen Teil des Zustands ab
    - analoge Aufteilung der kontinuierliche Aktualisierung
  - begrenzender Faktor ist das Kommunikationssystem
    - parallele Zustandstransfers erfordern auch mehr Bandbreite

☞ Absicherung des Zustandsabgleichs
  - latente Fehler im Zustand der übrigen Kanäle würden einfach kopiert
    - $\leadsto$ erhöht die Gefahr von Gleichtaktfehlern
  - explizite Einigung der Zustände unter den $C-1$ übrigen Kanälen
    - $\leadsto$ Ausführung eines vom ICN zu unterstützenden Einigungsprotokolls
    - $\leadsto$ sehr hoher Kommunikationsaufwand
  - statt der Daten selbst werden nur Signaturen ausgetauscht
    - Reduktion des Kommunikationsaufwands
    - Fehlererkennungsrate steht und fällt mit der verwendeten Signatur

„Recursive State Restoration“

- Zustandsänderung werden nicht kontinuierlich mitgeteilt
- ☞ Verwendung von indiziertem Speicher (engl. *tagged memory*)
  - jede Speicherstelle besitzt einen Merker, ob sie abgeglichen wurde

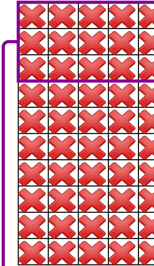


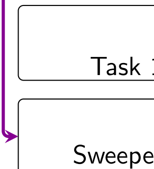


1. zunächst sind alle Speicherstellen markiert
   - d. h. sie müssen abgeglichen werden

„Recursive State Restoration“

- Zustandsänderung werden nicht kontinuierlich mitgeteilt
- ☞ Verwendung von indiziertem Speicher (engl. *tagged memory*)
  - jede Speicherstelle besitzt einen Merker, ob sie abgeglichen wurde



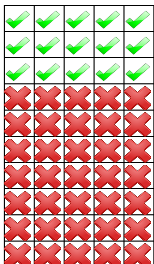


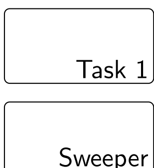
1. zunächst sind alle Speicherstellen markiert
   - d. h. sie müssen abgeglichen werden

2. „Sweeper“ gleicht nun Speicherstellen ab
   - wieviele hängt von der Bandbreite ab

„Recursive State Restoration“

- Zustandsänderung werden nicht kontinuierlich mitgeteilt
- ☞ Verwendung von indiziertem Speicher (engl. *tagged memory*)
  - jede Speicherstelle besitzt einen Merker, ob sie abgeglichen wurde



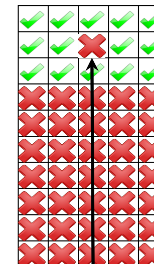


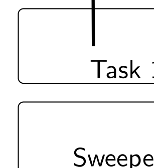
1. zunächst sind alle Speicherstellen markiert
   - d. h. sie müssen abgeglichen werden
2. „Sweeper“ gleicht nun Speicherstellen ab
   - wieviele hängt von der Bandbreite ab

   - und setzt die Markierung zurück

„Recursive State Restoration“

- Zustandsänderung werden nicht kontinuierlich mitgeteilt
- ☞ Verwendung von indiziertem Speicher (engl. *tagged memory*)
  - jede Speicherstelle besitzt einen Merker, ob sie abgeglichen wurde





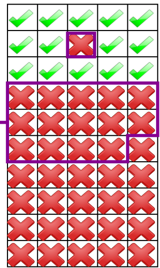
1. zunächst sind alle Speicherstellen markiert
   - d. h. sie müssen abgeglichen werden
2. „Sweeper“ gleicht nun Speicherstellen ab
   - wieviele hängt von der Bandbreite ab
   - und setzt die Markierung zurück

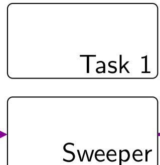
3. Anwendung modifiziert eine Speicherstelle
   - Markierung wird wieder gesetzt

„Recursive State Restoration“

- Zustandsänderung werden nicht kontinuierlich mitgeteilt

☞ Verwendung von indiziertem Speicher (engl. *tagged memory*)
- jede Speicherstelle besitzt einen Merker, ob sie abgeglichen wurde



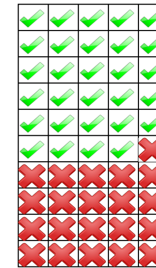


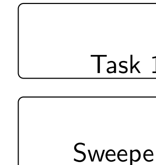
1. zunächst sind alle Speicherstellen markiert
   - d. h. sie müssen abgeglichen werden
2. „Sweeper“ gleicht nun Speicherstellen ab
   - wieviele hängt von der Bandbreite ab
   - und setzt die Markierung zurück
3. Anwendung modifiziert eine Speicherstelle
   - Markierung wird wieder gesetzt
4. anschließend tritt der „Sweeper“ in Aktion
   - gleicht wieder Speicherstellen ab

„Recursive State Restoration“

- Zustandsänderung werden nicht kontinuierlich mitgeteilt

☞ Verwendung von indiziertem Speicher (engl. *tagged memory*)
- jede Speicherstelle besitzt einen Merker, ob sie abgeglichen wurde





1. zunächst sind alle Speicherstellen markiert
   - d. h. sie müssen abgeglichen werden
2. „Sweeper“ gleicht nun Speicherstellen ab
   - wieviele hängt von der Bandbreite ab
   - und setzt die Markierung zurück
3. Anwendung modifiziert eine Speicherstelle
   - Markierung wird wieder gesetzt
4. anschließend tritt der „Sweeper“ in Aktion
   - gleicht wieder Speicherstellen ab
   - und setzt die Markierungen zurück
5. bis der Zustand abgeglichen ist . . .

„Recursive State Restoration“ (Forts.)

☞ genau das ist das Problem: Wie lange dauert der Abgleich?

⇝ gesonderter Zähler verwaltet Umfang des abzugleichenden Speichers
  - eine bestimmte Anzahl von Bytes kann „in einem Rutsch übertragen“ werden
  - ⇝ dies wird durch den Zähler überwacht ⇝ „last shot“

- Vorteile der „Recursive State Restoration“
  - Konsistenz der übertragenen Werte ist jederzeit gegeben
    - nur der „Sweeper“ überträgt den Zustand zum fehlerhaften Kanal
  - es erfolgt kein kontinuierlicher Abgleich ⇝ Entlastung des ICN
  - indizierter Speicher ist gut untersucht und verstanden
    - es existieren auch dedizierte hardware-basierte Implementierungen [1]
- Nachteile der „Recursive State Restoration“
  - unklare Dauer bis zum erfolgreichen Abschluss des Abgleichs
  - „last shot“ impliziert ein Stillhalten
    - bis zur Vollendung des Abgleichs sind keine Änderungen erlaubt
  - mehrere „Sweeper“ müssen sich über den „last shot“ einigen
    - schließlich verwalten sie unabhängige Zähler

Gliederung

1 Überblick

2 Grundlagen
- Vorgehen bei der Reintegration
- Fehlererholung
- Interner Zustand

3 Zustandstransfer

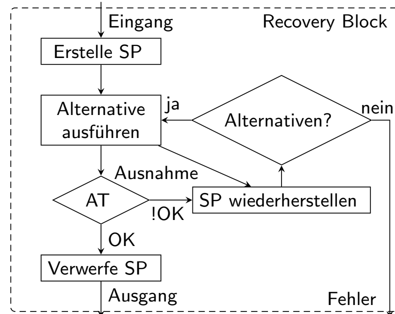
4 Rückwärtskorrektur durch Entwurfsalternativen

5 Zusammenfassung

Recovery Blocks (RcB)

Fehlererholung durch Rückwärtskorrektur

- Rückgriff auf alternative Implementierungen im Fehlerfall
  - wiederholte Ausführung ⇝ Toleranz transienter Fehler
  - alternative Implementierung ⇝ Toleranz von Software-Defekten
- ☞ Sicherungspunkte (SP) ermöglichen wiederholte Ausführung
  - Fehlererkennung/Validierung des Ergebnisses ↦ Akzeptanztest (AT)
    - AT umfasst sowohl logische als auch zeitliche Fehler (⇝ „Watchdog“)



Distributed Recovery Blocks (DRB, [7])

- parallele Ausführung verschiedener Alternativen in zwei Redundanzen
  - primäres und sekundäres Replikat überwachen sich gegenseitig
    - jedes Replikat für sich implementiert denselben „Recovery Block“
  - primäres Replikat ⇝ Ausführung der bevorzugten Implementierung
  - sekundäres Replikat ⇝ Ausführung der alternativen Implementierung
- vorsorgliche Fehlererholung im Sekundärreplikat
  - falls die bevorzugte Implementierung im Primärreplikat fehlschlägt
  - ⇝ das Ergebnis wurde bereits vom Sekundärreplikat berechnet
    - ⇝ sehr schnelle Fehlererholung, keine Rückwärtsbewegung
    - ⇝ Sicherungspunkt wird nur für die Fehlerbeseitigung benötigt
  - ⇝ verschiedene Rekonfigurationsszenarien denkbar [4]
    - Primär- und Sekundärreplikat tauschen die Rollen
    - tausche die bevorzugte und die alternative Implementierung
- ☞ Problemfall: Primär- und Sekundärreplikat schlagen fehl
  - eigenständige Fehlererholung nicht möglich
    - schließlich sind beide Implementierungsvarianten bereits fehlgeschlagen
  - ⇝ Zustand muss „von außen“ restauriert werden

Gliederung

1 Überblick

2 Grundlagen
- Vorgehen bei der Reintegration
- Fehlererholung
- Interner Zustand

3 Zustandstransfer

4 Rückwärtskorrektur durch Entwurfsalternativen

5 Zusammenfassung

Zusammenfassung

Problemstellung ↦ ein Replikat fällt aus
- dies führt zu einer verminderten Fehlertoleranz
- ⇝ Reintegration des ausgefallene Knotens

Grundlagen für die Reintegration
- reaktiv, proaktiv und reaktiv-proaktiv
- Vorwärts- und Rückwartskorrektur
- Initialzustand und dynamischer Zustand
- Bestandteile und Minimierung des dynamischen Zustands

Zustandstransfer von einem funktionsfähigen Replikat
- „one-shot SR“ vs. Zustandstransfer über mehrere Schritte
- „Running SR“ vs. „Recursive SR“

„Recovery Blocks“ – Diversitäre Replikate
- „Distributed Recovery Blocks“ ↦ parallele Ausführung
  - vorsorgliche Fehlererholung ⇝ Vorwärtskorrektur

Literaturverzeichnis

[1] Adams, S. ; Sims, T. :
A tagged memory technique for recovery from transient errors in fault tolerant systems.
In: *Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Real-Time Systems (RTSS '90)*.
Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, Dez. 1990. –
ISBN 0–8186–2112–5, S. 312–321

[2] Bondavalli, A. ; Di Giandomenico, F. ; Grandoni, F. ; Powell, D. ; Rabejac, C. :
State restoration in a COTS-based N-modular architecture.
In: *Proceedings of the 1st IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC '98)*.
Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, Apr. 1998. –
ISBN 0–8186–8430–5, S. 174–183

[3] 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

Literaturverzeichnis (Forts.)

[4] Kim, K. ; Yoon, J. :
Approaches to implementation of a repairable distributed recovery block scheme.
In: *Proceedings of the 18th International Symposium on Fault-Tolerant Computing (FTCS-18)*, 1988, S. 50–55

[5] Kopetz, H. :
Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications.
Kluwer Academic Publishers, 1997. –
ISBN 0–7923–9894–7

[6] Powell, D. ; Arlat, J. ; Beus-Dukic, L. ; Bondavalli, A. ; Coppola, P. ; Fantechi, A. ; Jenn, E. ; Rabejac, C. ; Wellings, A. :
GUARDS: a generic upgradable architecture for real-time dependable systems.
In: *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 10 (1999), Jun., Nr. 6, S. 580–599.
http://dx.doi.org/10.1109/71.774908. –
DOI 10.1109/71.774908. –
ISSN 1045–9219

[7] Pullum, L. L.:
Software fault tolerance techniques and implementation.
Norwood, MA, USA : Artech House, Inc., 2001. –
ISBN 1–58053–137–7