

Verlässliche Echtzeitsysteme

Reintegration fehlgeschlagener Knoten

Fabian Scheler

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

17. Juni 2013



Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Grundlagen
 - Vorgehen bei der Reintegration
 - Fehlererholung
 - Interner Zustand
- 3 Distributed Recovery Blocks
- 4 Zustandstransfer
- 5 Zusammenfassung



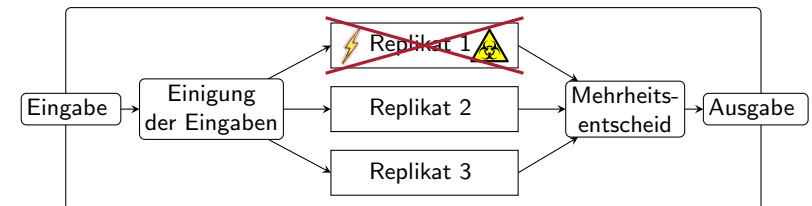
Fragestellungen

- 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 korruptierte Datenbasis zu reparieren



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 korruptiert
 - ~ **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



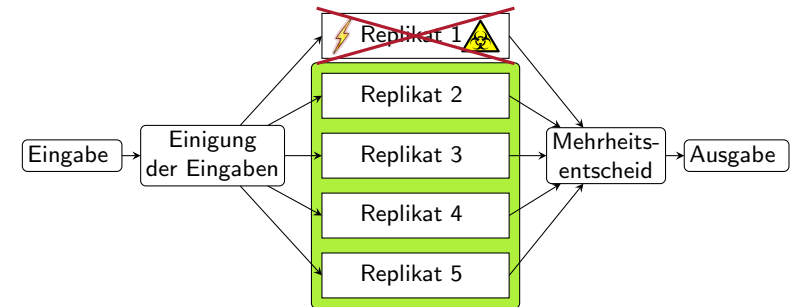
Reintegration fehlgeschlagener Knoten

Wie geht man grundsätzlich mit dem Ausfall eines Knotens um?

- 1 Fehlererkennung** \mapsto Ist ein Fehler aufgetreten?
 - zu Beginn steht die Erkennung, dass ein Replikant fehlerhaft ist
 - dies kann durch den Mehrheitsentscheid erfolgen, oder
 - das fehlerhafte Replikant teilt dies selbst mit (s. Folie VIII/11, *crash failure*)
- 2 Fehlerdiagnose** \mapsto Wo ist der Fehler aufgetreten?
 - Welches Replikant ist ausgefallen?
- 3 Rekonfiguration** \mapsto Das fehlerhafte Replikant „aussperren“.
 - das fehlerhafte Replikant darf nicht mehr am Betrieb teilnehmen
 - ggf. wird das Replikant durch ein Backup-System ersetzt
 - so wird die volle Fähigkeit Fehler zu tolerieren schnell wiederhergestellt
- 4 Fehlererholung** \mapsto Den Fehler beseitigen.
 - Kann der Fehler behoben werden, oder liegt ein permanenter Fehler vor?
 - Umsetzung durch einen Selbsttest, den das Replikant durchführt.
- 5 Reintegration** \mapsto Den Ursprungszustand wiederherstellen.
 - das Replikant wird wieder in den Verbund aufgenommen



Beispiel: Space Shuttle [3]



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



Reaktiv vs. Proaktiv

reaktive Fehlererholung \leadsto 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 \leadsto Vorbereitungen treffen

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

proaktive Fehlererholung \leadsto 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. Rückwärtsbewegung

Rückwärtsbewegung (engl. *roll backward, backward recovery*)

- Rückkehr zu einem **Sicherungspunkt** im Fehlerfall
 - \leadsto der Sicherungspunkt muss entsprechend vertrauenswürdig sein
- Bearbeitung muss komplett **umkehrbar** sein
 - \leadsto keine **nicht-zurücknehmbaren Aktionen** (engl. *irrevocable actions*)
 - \leadsto 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*)
- \leadsto für Echtzeitsysteme häufig **zu langwierig**

Vorwärtsbewegung (engl. *roll forward, forward recovery*)

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



Interner Zustand eines Replikats [5, Kapitel 4]

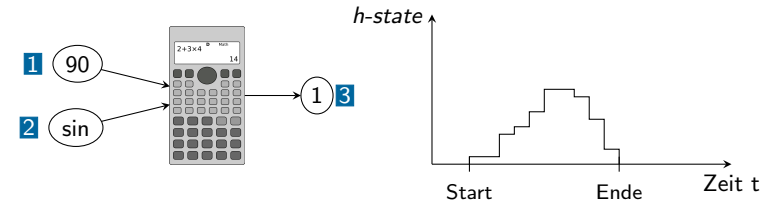


- zwei Teile sind maßgeblich für den Zustand eines Replikats
 - Initialzustand** (engl. *initialization state*, $i\text{-state}$)
 - statische, zur Laufzeit unveränderliche Datenstruktur
 - umfasst z. B. den Programmcode und Initialisierungsdaten
 - auch zur Laufzeit konstante Daten zählen hierzu
 - ↪ Ablage im **nicht-schreibbaren Speicher** (engl. *read-only memory*, *ROM*)
 - dynamischer Zustand** (engl. *history state*, $h\text{-state}$)
 - 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 \leadsto 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 \leadsto dynamischer Zustand der Summation

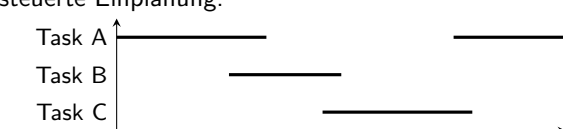
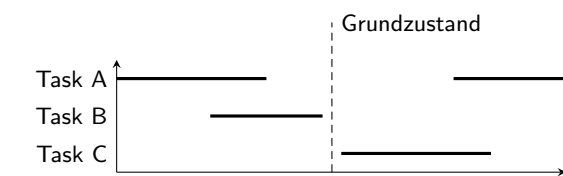


Minimierung des dynamischen Zustands

- 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 (s. Folie IX/10) 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 also am kleinsten
 - ↪ der Grundzustand ist für die Reintegration besonders geeignet
 - ↪ der Grundzustand sollte **regelmäßig eingenommen** werden
 - eine zyklische Ablaufstruktur (s. Folie VIII/16) unterstützt dies
 - nach jedem Zyklus „lesen, rechnen, schreiben“ wäre dies möglich



Erreichbarkeit des Grundzustands

- die Einplanungsstrategie hat hier einen signifikanten Einfluss
 - ereignisgesteuerte Einplanung:
 
 - zeitlicher Ablauf hängt vom Eintreffen der Ereignisse ab
 - ↪ das Erreichen des Grundzustands kann **nicht garantiert** werden
 - zeitgesteuerte Einplanung:
 
 - zyklensynchrone Ausführung erlaubt die **Einplanung des Grundzustands**
 - für Replikdeterminismus (s. Folie VIII/17) 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 also 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 Distributed Recovery Blocks

4 Zustandstransfer

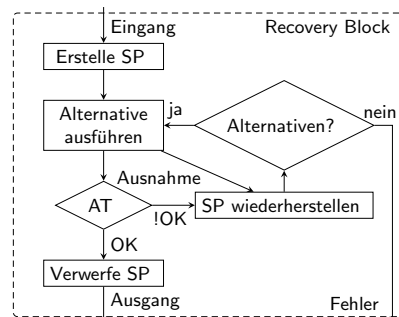
5 Zusammenfassung



Recovery Blocks (RcB)

Fehlererholung durch Rückwärtsbewegung

- 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 \mapsto 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 Distributed Recovery Blocks
- 4 Zustandstransfer
- 5 Zusammenfassung

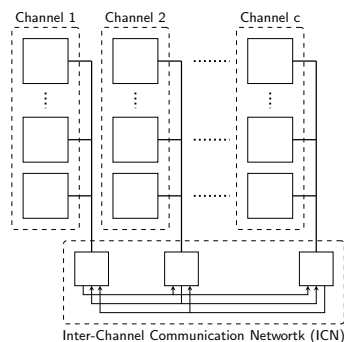


Zustandstransfer

- dynamischer Zustand \leadsto **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, oder
 - 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 IX/21) und „**Recursive SR**“ (s. Folie IX/24)



Systemstruktur – GUARDS [6]



- Grundbaustein: redundante **Kanäle** (engl. *channel*) \approx Replikate
 - Kanäle sind **fehlerengrenzende 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 \mapsto **ICN**
 - **statische, zyklische Kommunikation**, Uhrensynchronisation



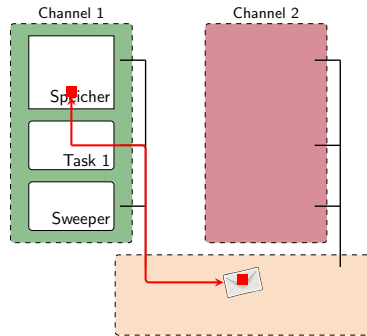
Grundsätzlicher Ablauf des Zustandsabgleichs

- ein GUARDS-System umfasse C redundante Kanäle
 - der Zustand einer dieser Kanäle muss restauriert werden \leadsto 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**“ \mapsto **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**“ \mapsto **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
 - \leadsto Transfers müssen im selben Zyklus gestartet und vollendet werden



„Running State Restoration“

Exemplarisch für ein zweikanaliges System

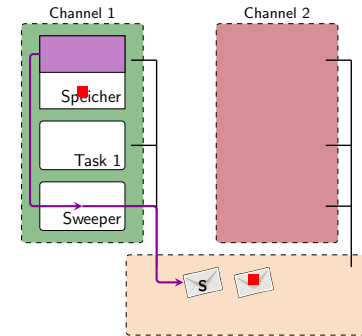


- Speichermodifikation während des Abgleichs ist möglich
 - Mitteilung der Änderungen per ICN



„Running State Restoration“

Exemplarisch für ein zweikanaliges System

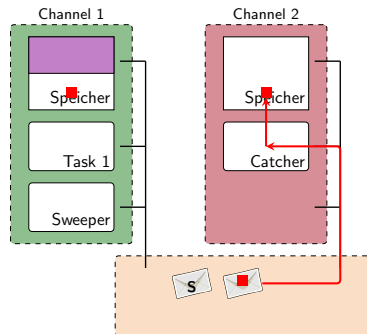


- Speichermodifikation während des Abgleichs ist möglich
 - Mitteilung der Änderungen per ICN
- Sweeper übernimmt den Rest
 - Versand ebenfalls per ICN



„Running State Restoration“

Exemplarisch für ein zweikanaliges System

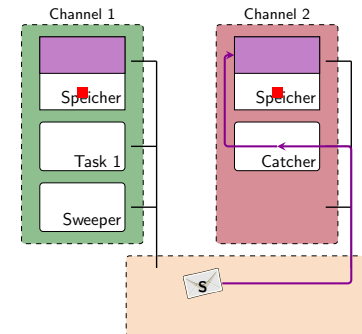


- Speichermodifikation während des Abgleichs ist möglich
 - Mitteilung der Änderungen per ICN
- Sweeper übernimmt den Rest
 - Versand ebenfalls per ICN
- Catcher nimmt Nachrichten an
 - aktualisiert den Speicher



„Running State Restoration“

Exemplarisch für ein zweikanaliges System

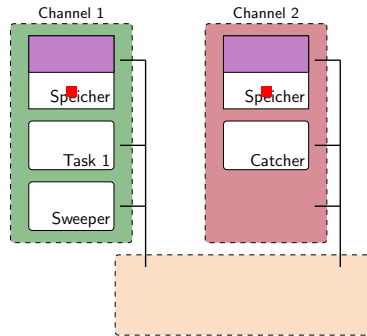


- Speichermodifikation während des Abgleichs ist möglich
 - Mitteilung der Änderungen per ICN
- Sweeper übernimmt den Rest
 - Versand ebenfalls per ICN
- Catcher nimmt Nachrichten an
 - aktualisiert den Speicher
 - Reihenfolge muss beachtet werden!



„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 genügend 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“ – Bitte Beachten!

- kont. Aktualisierung \mapsto **Speicherzugriff & Nachrichtenversand**
 - \rightsquigarrow **unteilbare Ausführung** nötig \mapsto Konsistenz der Speicherstelle wahren
- ☞ Reihenfolge der Speichertransfers ist wichtig!
 - „Catcher“ \rightsquigarrow **trivial**
 - Nachrichten werden in Ankunftsreihenfolge verarbeitet
 - „Sweeper“ \rightsquigarrow **schwierig**
 - Nachrichten müssen in richtigen Reihenfolge ans ICN übergeben werden
 - \rightsquigarrow Aufgaben und der „Sweeper“ müssen am ICN ausgerichtet werden
 - \rightsquigarrow 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
 - \rightsquigarrow keine „überlappenden“ Zustandstransfers
 - der „Catcher“ muss nur den Zyklus n beenden, bevor er mit $n + 1$ startet



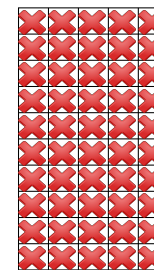
„Running State Restoration“ – für $C > 2$ Kanäle

- 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
 - \rightsquigarrow erhöht die Gefahr von Gleichaktfehlern
 - explizite **Einigung der Zustände** unter den $C - 1$ übrigen Kanälen
 - \rightsquigarrow Ausführung eines vom ICN zu unterstützenden **Einigungsprotokolls**
 - \rightsquigarrow **sehr hoher Kommunikationsaufwand**
 - statt der Daten selbst werden nur **Signaturen** ausgetauscht
 - Reduktion des Kommunikationsaufwands
 - **Fehlererkennungsrate** steht und fällt mit der verwendeten Signatur

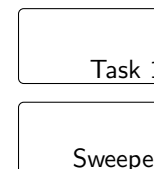


„Recursive State Restoration“

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

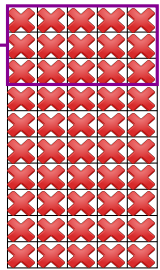


- 1 zunächst sind alle Speicherstellen markiert
 - d. h. sie müssen abgeglichen werden

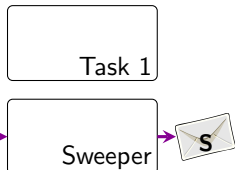


„Recursive State Restoration“

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

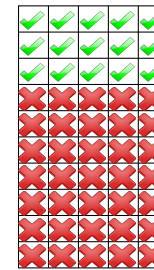


- 1 zunächst sind alle Speicherstellen markiert
 - d. h. sie müssen abgeglichen werden
- 2 „Sweeper“ gleicht nun Speicherstellen ab
 - wieviele hängt von der Bandbreite ab

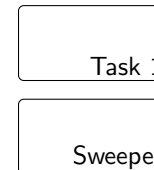


„Recursive State Restoration“

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

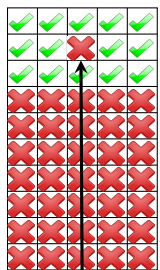


- 1 zunächst sind alle Speicherstellen markiert
 - d. h. sie müssen abgeglichen werden
- 2 „Sweeper“ gleicht nun Speicherstellen ab
 - wieviele hängt von der Bandbreite ab
 - und setzt die Markierung zurück

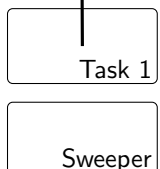


„Recursive State Restoration“

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

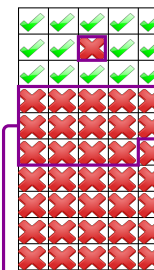


- 1 zunächst sind alle Speicherstellen markiert
 - d. h. sie müssen abgeglichen werden
- 2 „Sweeper“ gleicht nun Speicherstellen ab
 - wieviele hängt von der Bandbreite ab
 - und setzt die Markierung zurück
- 3 Anwendung modifiziert eine Speicherstelle
 - Markierung wird wieder gesetzt

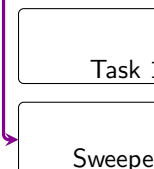


„Recursive State Restoration“

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

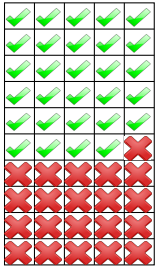


- 1 zunächst sind alle Speicherstellen markiert
 - d. h. sie müssen abgeglichen werden
- 2 „Sweeper“ gleicht nun Speicherstellen ab
 - wieviele hängt von der Bandbreite ab
 - und setzt die Markierung zurück
- 3 Anwendung modifiziert eine Speicherstelle
 - Markierung wird wieder gesetzt
- 4 anschließend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

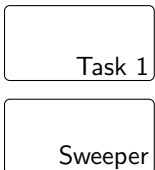


„Recursive State Restoration“

- Zustandsänderungen 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“
 - **unklarer 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 Distributed Recovery Blocks
- 4 Zustandstransfer
- 5 Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Problemstellung** \mapsto ein Replikat fällt aus
- dies führt zu einer **verminderten Fehlertoleranz**
 - ☞ Reintegration des ausgefallenen Knotens
- Grundlagen** für die Reintegration
- reaktiv, proaktiv und reaktiv-proaktiv
 - Vorwärts- und Rückwärtsbewegung
 - Initialzustand und dynamischer Zustand
 - Bestandteile und Minimierung des dynamischen Zustands
- „Recovery Blocks“ Reintegration durch Rückwärtsbewegung
- „Distributed Recovery Blocks“ \mapsto parallele Ausführung
 - vorsorgliche Fehlererholung \leadsto Vorwärtsbewegung
 - Rückwärtsbewegung nur für die Fehlerbeseitigung
- Zustandstransfer** von einem funktionsfähigen Replikat
- „one-shot SR“ vs. Zustandstransfer über mehrere Schritte
 - „Running SR“ vs. „Recursive SR“

- [1] ADAMS, S. ; SIMS, T. :
A tagged memory technique for recovery from transient errors in fault tolerant systems.
In: *Proceedings of the 11th International Conference 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



- [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

