Verlässliche Echtzeitsysteme

Verteilte Echtzeitsysteme

Peter Ulbrich

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

30. Juni 2015

Organisatorisches

- Eure Meinung ist uns wichtig! (Lob und/oder Kritik)
  → Bitte evaluiert Vorlesung und Übung

⚠ Nach aktuellem Stand erst **2**/13 TANs genutzt.

Motivationsanreiz zur Evaluation

- **Traditionell**: Kaffee und Kekse in der letzten Vorlesung
- **Bedingung**: $\geq 60\%$ der ausgegebenen TANs werden evaluiert!

Fragestellungen

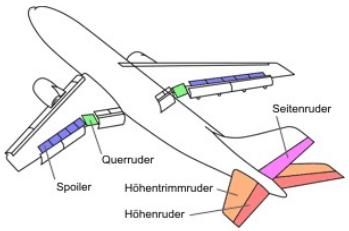
- Wie lässt sich die Verlässlichkeit weiter steigern?
  - Verteilung von Funktionen?
  - Was bringt uns hier die Replikation?
- Wie muss die hierfür notwendige Kommunikationsinfrastruktur aussehen?
  - Wie lässt sich Fehlerausbreitung verhindern?
  - Zeit- vs. ereignisgesteuerte Kommunikation?
- Was passiert nach dem Auftreten eines (transienten) Fehlers?
  - Wie kann sich ein Replikat von einem Fehler erholen?
  - Wie lassen sich Knoten reintegrieren?

Gliederung

Flugsteuerung (engl. *Flight Control*)

Wie wird ein Flugzeug gesteuert?

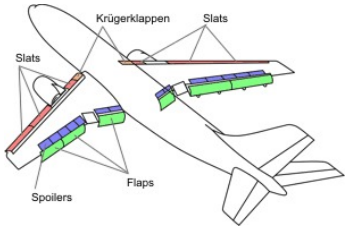
- Steuerflächen (engl. *control surfaces*) und ihre Ansteuerung
  → Elemente um die Lage des Flugzeugs im Raum zu ändern
- Primäre Steuerflächen eines Flugzeugs:



  - Querruder (engl. *ailerons*)
    → Rollen um die Längsachse
  - Seitenruder (engl. *rudder*)
    → Gieren um die Hochachse
  - Höhenruder (engl. *elevator*)
    → Kippen um die Querachse
  - Störklappe (engl. *spoiler*)
    → Verlangsamen, unterstützt Gieren
- Höhentrimmruder (engl. *trimmable horizontal stabilizer, (THS)*)
  → Höhensteuerung und Höhentrimmung

Flugsteuerung (engl. *Flight Control*) (Forts.)

- Sekundäre Steuerflächen und Auftriebshilfen:

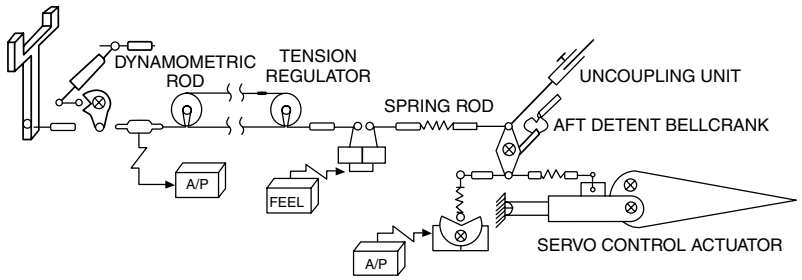


  - Vorflügel (engl. *slats*)
    → Höherer Auftrieb durch mehr Wölbung
  - Krügerklappen (engl. *Kruger slats*)
    → Ähnlich dem Vorflügel, aber einfacher
  - Landeklappen (engl. *flaps*)
    → Auftriebshilfen für den Landeanflug
    → Ermöglichen verminderte Geschwindigkeit beim Landen
- Vielzahl weiterer Typen (für Technikbegeisterte):
  - Kippnasen, Spalt, Fowler, Spreiz-Klappen, Junkers-Doppelflügel, ...

⚠ Flugzeuge haben i. d. R. nur eine Auswahl der genannten Steuerflächen

Ansteuerung der Steuerflächen

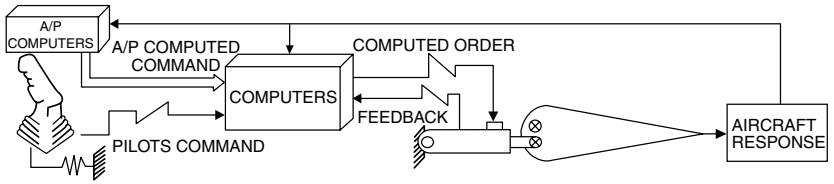
Quelle Grafik: [3]



- Mechanische Systeme ⇝ direkte Verbindung zur Steuerfläche
  - Ein Lenkgestänge verbindet Steuerknüppel und Steuerflächen direkt
    - Am Steuerknüppel ist der Luftwiderstand an der Steuerfläche spürbar
    → Problematisch bei großen Flugzeugen/hohen Geschwindigkeiten
- Elektrische/hydraulische Systeme ⇝ motorisierte Aktoren
  - Der Pilot steuert die Steuerfläche mithilfe von Aktoren an
    - Lenkbefehle öffnen Ventile oder setzen Servomotoren in Gang
    - Mechanische Ansteuerung erhält Verbindung
    → Servolenkung welche den Piloten untersützt

Ansteuerung der Steuerflächen (Forts.)

Quelle Grafik: [3]



- Elektrische/elektronische Ansteuerung ⇝ Fly-by-Wire
  - Analog ⇝ Steuerbefehle werden direkt auf elektrische Signale umgesetzt
  - Digital ⇝ computergesteuerte Umsetzung der Steuerbefehle
  → Force Feedback zur Rückmeldung wird notwendig!

☞ Digitale Fly-by-Wire-Systeme haben diverse Vorteile
- Gewichtsersparnis im Vergleich zur Mechanik und zur Analogtechnik
- Computerunterstützung: Autopilot, Erhöhung der Flugzeugstabilität, Absicherung des sicheren Flugbereichs (engl. *flight envelope*)

Historie: Fly-by-Wire

1930er **Tupolev ANT-20 Maxim Gorky**
- Lange mechanische Steuerstrecken wurden elektrisch überbrückt

1958 **Avro Canada CF-105 Arrow**
- Erstes militärische Serienflugzeug mit analogem Fly-by-Wire
- Auch Force Feedback (engl. *artificial feel*) wurde integriert

1969 **Concorde**
- Erstes ziviles Verkehrsflugzeug mit analogem Fly-by-Wire

1972 **F-8 Crusader**
- Forschungsprojekt für digitales Fly-by-Wire
  - Eine digitale Flugsteuerung, drei analoge Backup-Systeme
- Etwa zeitgleich: Sukhoi T-4 (UdSSR), Hawker Hunter (GBR)

1977 **Space Shuttle Orbiter** ⇝ komplett digitale Flugsteuerung

1984 **Airbus A320**
- Erstes Verkehrsflugzeug mit vollständig digitaler Flugsteuerung
  - Es existieren aber weiterhin elektrische Backup-Systeme

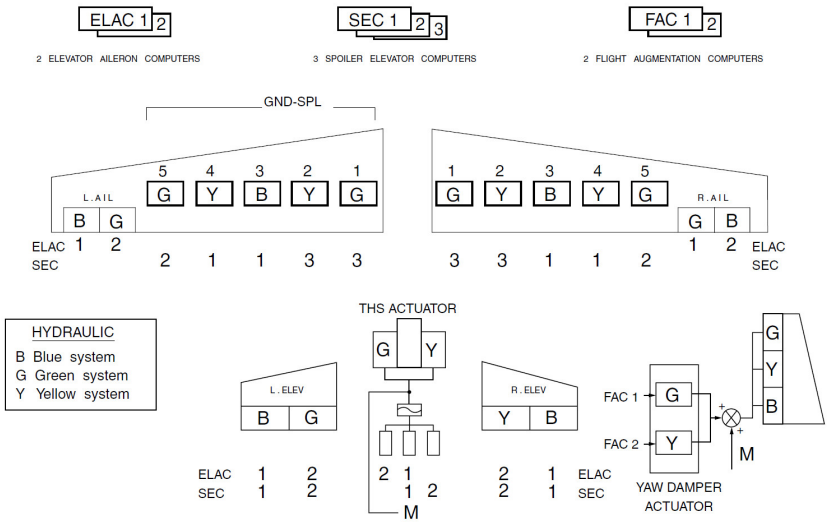
Flugsteuerung im A320/A330/A340 [3]

☞ redundanter Aufbau der Flugsteuerung
- 7 (A320/321) bzw. 5 (A330/340) Computer zur Flugsteuerung
  - Hardware Replikation und Implementierung von fail-silent-Verhalten
- 3 Hydraulikkreisläufe zur Versorgung der Aktoren
- Stromversorgungen durch unabhängige Generatoren an den Triebwerken
  → ≥ 2 Stromkreise + Notstromversorgung (Batterien, Windrad)

☞ diversitärer Aufbau der Flugsteuerung
- Verschiedene Steuercomputer im A320/A321 [3]
  - 2 Elevator Aileron Computer (ELAC) ⇝ Motorola 68010 (Thomson-CSF)
  - 3 Spoiler Elevator Computer (SEC) ⇝ Intel 80186 (SFENA/Aerospatiale)
  - 2 Flight Augmentation Computer (FAC)
- Verschiedene Steuercomputer ab A330/A340 [12]
  - 3 Flight Control Primary Computers (PRIM) ⇝ Power PC
  - 2 Flight Control Secondary Computers (SEC) ⇝ Sharc
- Jeder Computer besteht aus einem Kontroll- und einem Monitor-Kanal
  - Verwendung unterschiedlicher Softwarepakete (z. B. Codegeneratoren)
  → 4 Softwarepakete: 2 x ELAC, 2 x SEC im A320/321

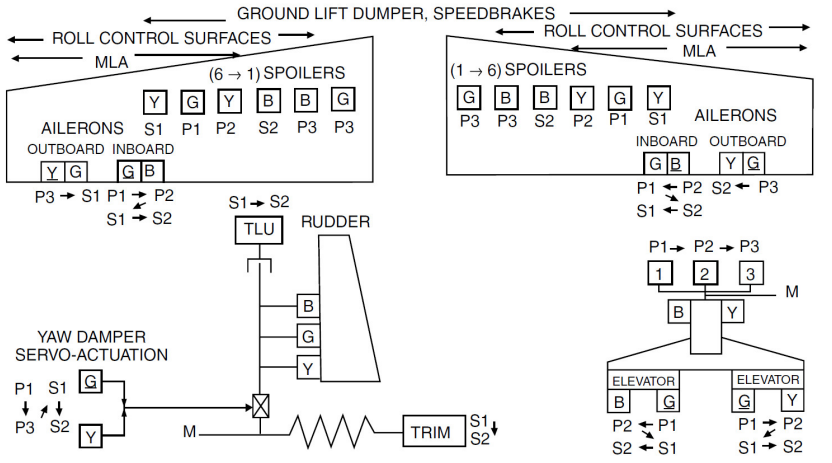
Flugsteuerung A320/A321

Quelle Grafik: [3]



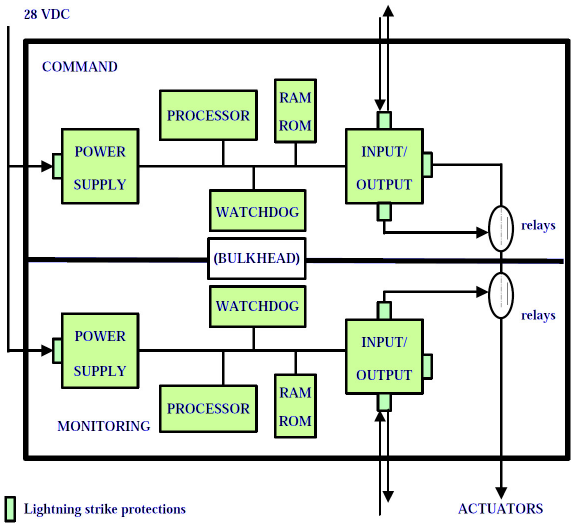
Flugsteuerung A330/A340

Quelle Grafik: [3]



Aufbau eines A330/A340-Steuercomputers

Quelle Grafik: [12]



Selbstüberwachung und Rekonfiguration

- Selbstüberwachung einzelner Steuercomputer
  - Stetige gegenseitige Überwachung von Kontroll- und Monitor-Kanal
    - Vergleich von Ausgaben und ausgewählten Zustandsvariablen
    - Übersteigt die Differenz einen gewissen Schwellwert ⇝ Fehler
  - Selbsttests werden zumindest bei Systemstart durchgeführt
    - Flugzeuge werden anders als Kernkraftwerke öfters neu gestartet
- Rekonfiguration ⇝ Graceful Degradation
  - Regelkreise zur Fluglageregelung sind auf Sensoren angewiesen
    - Andernfalls kann der Zustand des Flugzeugs nicht mehr erfasst werden
  - Im Fokus: Air Data and Inertial Reference Units (ADIRUs)
    - Nicken ⇝ Unterstützung durch Beschleunigungssensoren und Gyroskope

    → Funktionelle Redundanz

→ Graceful Degradation ⇝ Rückzug auf eine direkte Flugsteuerung
  - z. B. wenn alle ADIRUs ausgefallen sind

    → Keine computergestützte Fluglageregelung, kein gesicherter Flugbereich

Gliederung

Problemstellung

⚠ Zuschnitt und Platzierung von Funktionen und die Auslegung ihrer Schnittstelle bilden wesentliche Aktivitäten des Entwurfs von verlässlichen Echtzeitrechensystemen
- Bestimmt die Eigenschaften des Systems als Ganzes
- Zentralisierung erschwert Fehlerdiagnose und Analyse von Fehlereffekten

☞ Herausforderung dabei ist, dass die Abstraktionen an den Schnittstellen auch im Fehlerfall ihre Gültigkeit haben sollten

- Ideal ist ein verteiltes Rechensystem mit einer 1-zu-1-Beziehung zwischen Funktion und Rechenknoten
  - Ursache bzw. Knoten einer Fehlfunktion ist leicht identifizierbar
  - Auswirkungen eines fehlerhaften Knotens sind gut vorhersehbar

Reaktionsfähiges System (engl. *responsive system*)

↦ Verteilung + Echtzeitperformanz + Fehlertoleranz [10]

⚠ Voraussetzung: Fehlererkennung auch im verteilten Fall!

☞ Replikation (der Funktionen) von Knoten (vgl. Folie VIII/9 ff.)

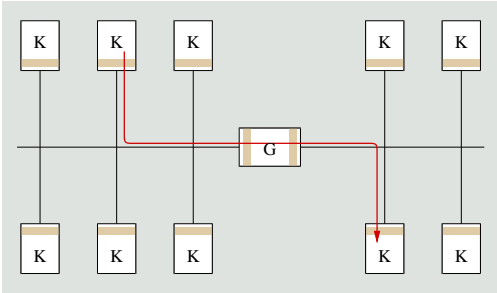
- Erfordert Replikdeterminismus (engl. *replica determinism* [11])
- Im Wertebereich: Gleiche Eingaben führen zu gleichen Ergebnissen!
- Im Zeitbereich:
  - Aktiv replizierte Knoten sehen denselben Zustand *zur selben Zeit*
  - Mit Zugeständnis zur endl. Genauigkeit der *Uhrensynchronisation*

→ Ohne diese Vorraussetzungen ist ein Mehrheitsentscheid sinnlos!

☞ Fehlereingrenzung durch eine Sicherheitshülle (engl. *containment*)

- Fehlertolerante Systeme sind in Partitionen strukturiert
  - In fehlereingrenzende Regionen (engl. *error-containment regions*)
- Fehler, die in einer Partition auftreten, bleiben isoliert
  - Sie werden lokal erkannt und korrigiert oder maskiert
  - Sie können das restliche System nicht beschädigen

Zeitgesteuerte vs. Ereignisgesteuerte Kommunikation

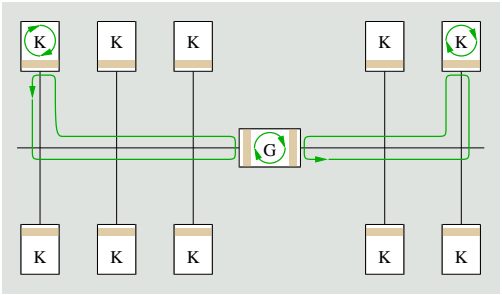


Ereignisgesteuertes Kommunikationssystem

- Kommunikation basiert auf Ereignisnachrichten
- Auslösezeitpunkt und Übertragung abhängig von Lastsituation
- Einfluss durch Ausfall/Integration von Knoten

→ Nicht für die Kapselung des Zeitverhaltens geeignet!

Zeitgesteuerte vs. Ereignisgesteuerte Kommunikation



Zeitgesteuertes Kommunikationssystem

- Kommunikation basiert auf Zustandsnachrichten
- Kein unkoordinierter Nachrichtenversand, Auslastung vorab bestimmbar

→ Kapselung des zeitlichen Verhaltens (temporale Brandmauer)!

⚠ Uhrensynchronisation erforderlich

ARINC 629 — Minislotting

Zeitkontrolliertes Zugangsverfahren

- Aeronautical Radio Incorporated 629 Standard [1]
  - Entwickelt für die Boeing 777
  - Erstmaliger Einsatz eines standardisierten Bussystems
  - Teilnehmer können ihre Daten in festgelegten Zeitintervallen versenden
  - Kein (böswilliger) Knoten kann den Bus monopolisieren (Busschutz)
- Aufteilung der Zeit in Minischlitze (engl. *mini slots*)
  - Kommunikation wird in 3 Zeitintervalle unterteilt
    - Sendeintervall, Synchronisation, Gerätekennung
    - Länger als die Ausbreitungsverzögerung des Kanals
    - Jedem Knoten ist eine eindeutige Anzahl von *Minislots* zugeordnet
  - Ein Warteraumprotokoll ähnlich zum Bäckereialgorithmus [9]
    - Zunächst finden sich alle Sender in einem (verteilten) Warteraum ein
    - Im nachfolgenden Zeitintervall (Epoche) findet die Kommunikation statt

⚠ Achtung: Medienzugriff basiert auf CSMA/CD ⇝ Mischform!

ARINC 629 — Minislotting (Forts.)

Zeitparameter zur Kontrolle des Zugangs zum Übertragungsmedium

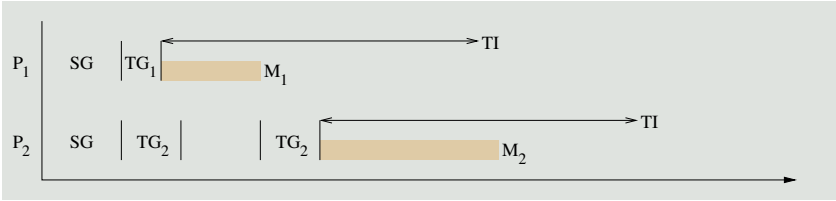
- TI (engl. *transmit interval*) ⇝ Sendeintervall
  - Verhindert Monopolisierung des Busses: identisch für alle Knoten
- SG (engl. *synchronization gap*) ⇝ Synchronisationsintervall
  - Kontrolliert Zutritt zum Warteraum: identisch für alle Knoten
- TG (engl. *termination gap*) ⇝ Gerätepriorisierung
  - Kontrolliert den Buszugriff: unterschiedlich für jeden Knoten

- Relationen zwischen den Zeitparametern (*Timeouts*):
  - $SG > \max(TG_i)$, für alle Knoten bzw. Prozesse i
  - $TI > SG$

ARINC 629 — Beispiel

Protokollverlauf

Prozesse P_1 und P_2 wollen gleichzeitig senden, $TG_1 < TG_2$:



1. P_1 und P_2 warten SG Zeiten Busruhe ab, betreten den Warteraum
2. jeder Prozess i wartet zusätzlich noch seine TG_i Zeiten Busruhe ab
3. wegen $TG_1 < TG_2$ sendet P_1 zuerst seine Nachricht M_1
4. P_2 erkennt Verkehr auf den Bus; wartet, bis M_1 übertragen wurde
5. P_2 wartet TG_2 Zeiten Busruhe ab und sendet seine Nachricht M_2
6. P_1 und P_2 können frühestens nach TI Zeiten erneut senden

TDMA (engl. *time division multiple access*)

a.k.a. Avionics Full-Duplex Ethernet Switching (AFDX)

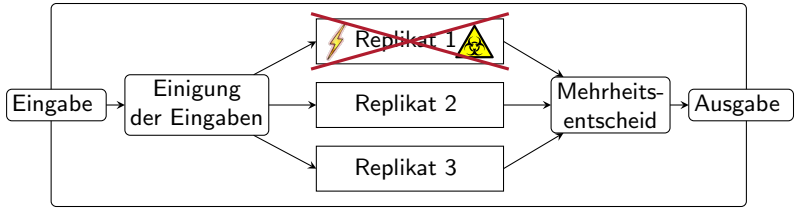
- Übertragungsrechte durch Voranschreiten der Echtzeit:
  - Voraussetzung: fehlertolerante globale Zeitbasis in allen Knoten
  - statische Aufteilung der gesamten Kanalkapazität in Zeitschlitze
    - Jeder Knoten (Busteilnehmer) hat einen eindeutigen Sendeschlitz
    - TDMA Runde ⇝ Sequenz von Sendeschlitzen einer Knotengruppe
    - In jeder Runde kann ein Knoten eine Nachricht übertragen
    - Ist nichts zu versenden, bleibt ein Rahmen (engl. *frame*) leer
  - Runden wiederholen sich ⇝ Gruppentakt (engl. *cluster cycle*)
    - Sequenz verschiedener TDMA-Runden
    - Die Gruppentaktlänge bestimmt die Periodizität des TDMA-Systems
- Grundlagenforschung: TTP (engl. *time-triggered protocol* [8])
  - Kommerzielle Varianten:

    byteflight ([2], Sicherheits- und Informationsbussystem: SI-BUS)
    FlexRay ([6], zeit- *und* ereignisgesteuerter Bus)
    AFDX ([5], Airbus, Boeing, NASA)

Gliederung

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 hierdurch korrumpiert

→ Das Replikat fällt aus ...

☞ Dies bedeutet eine Reduktion der Fähigkeit Fehler zu tolerieren

- Nur noch zwei funktionsfähige Replikate ⇝ das System ist verwundbar

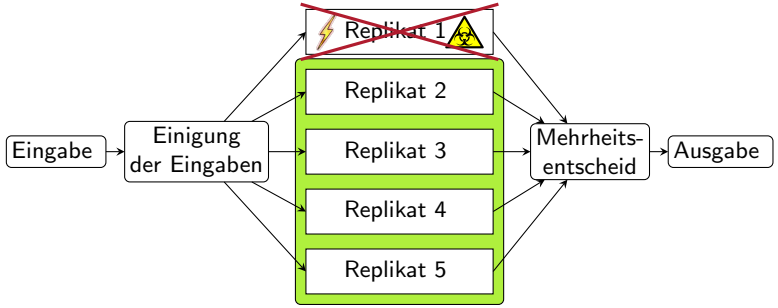
→ Replikat 1 muss sich erholen und reintegriert werden

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 VIII/11, 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 [4]



- 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 [7, Kapitel 4]

- Zwei Teile sind maßgeblich für den Zustand eines Replikats

Initialzustand (engl. *initialization state, i-state*)

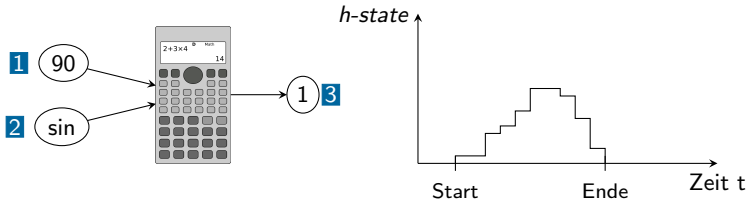
- Statische, zur Laufzeit unveränderliche Datenstruktur
  - Umfasst z. B. den Programmcode und Initialisierungsdaten
  - Auch zur Laufzeit konstante Daten zählen hierzu
- → Ablage im nicht-schreibbaren Speicher (engl. *read-only memory, ROM*)

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

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

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!

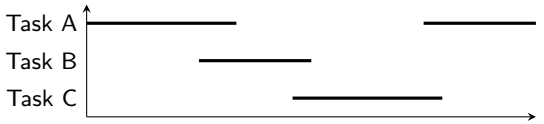
☞ Zu bevorzugen ist der Grundzustand (engl. *ground state*)
- Systemweit ist keine Berechnung aktiv, alle Nachrichtenkanäle sind leer
  - Der dynamische Zustand ist im Grundzustand demnach am kleinsten

→ der Grundzustand ist für die Reintegration besonders geeignet

→ der Grundzustand sollte regelmäßig eingenommen werden
  - Eine zyklische Ablaufstruktur (s. Folie VIII/14) unterstützt dies
  - Nach jedem Zyklus lesen, rechnen, schreiben wäre dies möglich

Erreichbarkeit des Grundzustands

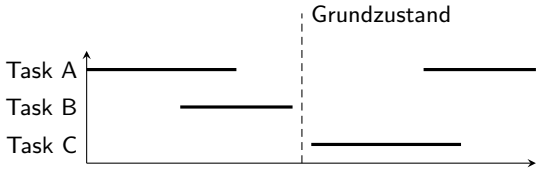
- Die Einplanungsstrategie hat hier einen signifikanten Einfluss
  - Ereignisgesteuerte Einplanung:



    - 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/15) ist dies ohnehin sinnvoll

Gliederung

Zusammenfassung

Verlässlichkeit durch Verteilung ↦ Funktionen trennen und replizieren
- Am Beispiel von Fly-By-Wire

Kommunikationssysteme ↦ Fehlereingrenzung
- Ereignis- vs. Zustandsnachricht
- Zeitgesteuerte Kommunikation (ARINC 629, TDMA)

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

Literaturverzeichnis

[1] Audsley, N. C. ; Grigg, A. :
Timing Analysis of the ARINC 629 Databus for Real-Time Applications.
In: *Proceedings of the ERA Avionics Conference and Exhibition.*
Heathrow, UK : ERA Technology Ltd, Nov. 20–21, 1996, S. 10.1.1–10.1.11

[2] Berwanger, J. ; Peller, M. ; Griessbach, R. :
byteflight — A New Protocol for Safety Critical Applications.
In: *Proceedings of the 28th FISITA World Automotive Congress.*
Seoul, Korea : FISITA, Jun. 12–15, 2000

[3] *Kapitel* 12.
In: Briere, D. ; Favre, C. ; Traverse, P. :
Electrical Flight Controls, From Airbus A320/A330/A340 to Future Military Transport Aircraft: A Family of Fault-Tolerant Systems.
CRC Press LLC, 2001 (The Electrical Engineering Handbook Series). –
ISBN 978–0849383489

[4] 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.)

[5] Charara, H. ; Scharbarg, J.-L. ; Ermont, J. ; Fraboul, C. :
Methods for bounding end-to-end delays on an AFDX network.
In: *Real-Time Systems, 2006. 18th Euromicro Conference on* IEEE, 2006, S. 10–pp

[6] FlexRay Consortium:
FlexRay protocol specification 2.1 Revision A.
FlexRay Consortium, 2005. –
http://www.flexray.com

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

[8] Kopetz, H. ; Grünsteidl, G. :
TTP—A Time-Triggered Protocol for Fault-Tolerant Real-Time Systems.
In: *Proceedings of the Twenty-Third Annual International Symposium on Fault-Tolerant Computing (FTCS-23).*
Toulouse, France : IEEE, Jun. 22–24, 1993, S. 524–533

[9] Lamport, L. :
A New Solution of Dijkstra's Concurrent Programming Problem.
In: *Communications of the ACM* 8 (1974), Nr. 7, S. 453–455

Literaturverzeichnis (Forts.)

[10] Malek, M. :
Responsive Computer Systems.
In: *Real-Time Systems* 7 (1994), Nr. 3. –
Special Issue

[11] Poledna, S. :
Replica Determinism in Faul-Tolerant Distributed Real-Time Systems.
Vienna, Austria, Technical University of Vienna, Diss., 1995. –
Research Report 28/95

[12] Traverse, P. ; Lacaze, I. ; Souyris, J. :
Airbus Fly-By-Wire: A Process Toward Total Dependability.
In: *Proceedings of the 25th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS '06)*, 2006