

# Überblick

Rekapitulation  
Rückblick

# Einleitung

**Echtzeitbetrieb** eines Rechensystems in seiner Umgebung

- ▶ schwache, starke oder strikte Echtzeitbedingungen

**Fallbeispiel** (Wärmetauscher)

- ▶ Schritt- und Antwortfunktion, Abtastrate, Zeitparameter
- ▶ Schwankungen in den Messergebnissen, Totzeit

**Anforderungen** funktionaler und nicht-funktionaler Art

- ▶ Aufzeichnung, Vergütung, Überwachung (dig. Kontrolle), Interaktion
- ▶ Rechtzeitigkeit und Verlässlichkeit

**Klassifikation** nach äußeren und inneren Faktoren

- ▶ *hard/soft real-time, fail safe/operational*
- ▶ *guaranteed response/best effort, resource adequate/inadequate*
- ▶ *event/time triggered*

**eingebettete Systeme** sind spezielle Echtzeitsysteme

# Grundlagen

**Einplanungseinheit**  $\mapsto$  Prozedur, Faden und/oder Fadengruppe

- ▶ Aufgaben (*Tasks*) von Arbeitsaufträgen (*Jobs*)
- ▶ Verwaltungsgemeinkosten ein- und mehrfädiger Ausgaben
- ▶ verdrängbare und/oder nicht-verdrängbare Prozessinstanzen

**Programmunterbrechung** in synchroner oder asynchroner Ausprägung

- ▶ Zustandssicherung, Verwaltungsgemeinkosten des schlimmsten Falls
- ▶ *Interrupts* machen determinierte Programme nicht-deterministisch
  - ▶ nicht zu jedem Zeitpunkt ist bestimmt, wie weitergefahren wird
- ▶ Unvorhersagbarkeit, Überlast, Verzögerung, . . . , Nebenläufigkeit

**Unterbrechungstechnik**  $\mapsto$  Pegelsteuerung & Flankensteuerung

- ▶ Problem der Wiederbehauptung flankengesteuerter *Interrupts*
- ▶ maskierbare und nicht-maskierbare Unterbrechungen
- ▶ kaskadierbare bzw. kaskadierte Unterbrechungen

# Ablaufsteuerung

**Trennung unterschiedlicher Belange**  $\mapsto$  Strategie & Mechanismus

- ▶ Einplanung ist die Strategie, Einlastung ist der Mechanismus

**Arbeitsweise** ist zeit- oder ereignisgesteuert: Einplanung & Einlastung

- ▶ entkoppelt im zeitgesteuerten System (Taktsteuerung)
- ▶ gekoppelt im ereignisgesteuerten System (Vorrangsteuerung)

**Zeitparameter** sind Punkte und Intervalle auf der Echtzeitachse

- ▶ (sporadische) Auslösezeit, (absoluter) Termin
- ▶ Antwortzeit bzw. relativer Termin, Schlupfzeit

**Taskmodelle** für periodische Aufgaben

- ▶ aperiodische oder sporadische Aufgaben bzw. Arbeitsaufträge
  - ▶ je nach dem, ob Jobtermine weich/fest oder hart sind
- ▶ Rangfolgen, Abhängigkeiten, Koordinierung, Verdrängung

**Verfahren** EDF, LRT, LST, RM und DM

# Taktsteuerung

**Ablauf Tabellen**  $\mapsto$  vorberechnete (statische) Ablaufpläne

- ▶ Tabelleneinträge sind Jobs und deren Einlastungszeitpunkte

**Einlastung und Laufzeitkontrolle** im Abfrage- oder Unterbrecherbetrieb

- ▶ Taktzähler, Zeitgeber, Zeitkontrolle; Job als Routine/Koroutine

**Struktur zyklischer Ablaufpläne**  $\rightsquigarrow$  „gute Anordnung“, Determinismus

- ▶ Rahmen, Rahmenlänge, Scheiben; *major/minor cycle*

**nichtperiodische Arbeitsaufträge**  $\mapsto$  periodische/sporadische Jobs

- ▶ Schlupf (stehlen); Einplanung, Antwortzeitverbesserung, Einlastung
- ▶ Übernahmeprüfung (engl. *acceptance test*), Ausnahmebehandlung

**Betriebswechsel** bewerkstelligen aperiodische oder sporadische Jobs

- ▶ Tabellenwechsel, Betriebsmittelfreigabe/-anforderung, Nachladen

# Vorrangsteuerung

**Prioritäten** gebunden an Ereignisauslöser oder -verarbeiter

- ▶ fest auf Task- und/oder Jobebene, ggf. dynamisch auf Taskebene
- ▶ Einplanungsaufwand: Auslöse- vs. Auswahlzeitpunkt von Jobs

**Prioritätsabbildung** mangels Systemprioritäten bzw. Prioritätsebenen

- ▶ gleichmäßig oder ungleichmäßig, *constant ratio mapping*
- ▶ Einfluss auf die Planbarkeit (engl. *schedulability*) eines Systems

**Repräsentation von Ablaufplänen**  $\mapsto$  Prioritätsschlange auf Tabellenbasis

- ▶ indizierte Bereitliste (*multi-level queue*), Aufwand begrenzen
- ▶ *O(1)-Scheduler*: Jobsauslösung vs. Jobauswahl

**Prioritätsverletzung und Prioritätsumkehr** Selbstaussetzung/Hemmung

- ▶ kritische Abschnitte, unteilbare Betriebsmittel, Fernaufrufe
- ▶ Abstraktion „*considered harmful*“, nichtfunktionale Eigenschaften

# Zugriffskontrolle

## Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- ▶ Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- ▶ Konfliktsituationen  $\leadsto$  **synchronisieren ohne Prioritätsumkehr**

## Verdrängungssteuerung $\mapsto$ verdrängungsfreie kritische Abschnitte

- ▶ benötigt kein *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- ▶ pragmatisch/effektiv, beeinträchtigt unabhängige Jobs

## Prioritätsvererbung $\mapsto$ Priorität zeitweise erhöhen

- ▶ benötigt kein *à priori* Wissen
- ▶ direkte Blockierung, Blockierung durch Vererbung; transitiv

## Prioritätsobergrenzen $\mapsto$ Priorität zeitweise deckeln

- ▶ benötigt *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- ▶ Grundmodell vs. (einfachere) stapelorientierte Variante

# Zustellerkonzepte

**Problemfälle**  $\mapsto$  Hintergrund-/Unterbrecherbetrieb, Schlupf

- ▶ periodische Verarbeitung nichtperiodischer Arbeitsaufträge
- ▶ Korrektheit und Optimalität von Ablaufplänen

**periodische Zusteller** (engl. *periodic server*)

- ▶ periodische Überprüfung der Warteschlange aperiodischer Jobs
- ▶ Ausführungsbudget, Verbrauchs- und Auffüllregeln

**Bandweite verlierende Zusteller**  $\mapsto$  Ausführungsbudget

- ▶ abfragender Zusteller (engl. *polling server*, *poller*)
- ▶ Verfall des Restbudgets zum Zeitpunkt des Untätigkeitswerdens

**Bandweite erhaltende Zusteller** (engl. *bandwidth-preserving server*)

- ▶ aufschiebbarer Zusteller (engl. *deferrable server*)
- ▶ einfacher sporadischer Zusteller (engl. *simple sporadic server*)

# Planbarkeitsanalyse

**Problemstellung**  $\mapsto$  werden alle Termine eingehalten?

- ▶ **implizit** gegeben in taktgesteuerten Systemen
- ▶ muss **explizit** geprüft werden in vorrangesteuerten Systemen

**Optimalität** eines Ablaufplanungsalgorithmus

- ▶ für eine gewisse Klasse von Aufgaben
- ▶  $\rightsquigarrow$  existiert ein zulässiger Ablaufplan, wird er gefunden

**Komplexität** die Analyse der Zulässigkeit ist schwierig

- ▶ nur die einfachsten Varianten sind in polynomieller Zeit lösbar
- ▶ Semaphore, Nachrichten,  $\dots \rightsquigarrow$  **stark  $\mathcal{NP}$ -hart**

**Ansätze** zur Analyse der Zulässigkeit

- ▶ **dynamische** Prioritäten  $\rightsquigarrow$  CPU-Auslastung, Zeitbedarfsanalyse
- ▶ **statische** Prioritäten  $\rightsquigarrow$  Antwortzeitanalyse, Simulation

# Architektur

Erscheinungsform  $\mapsto$  **verteiltes Echtzeitrechensystem**

- ▶ Netzwerkschnittstelle, Kommunikationssteuerung
- ▶ externe vs. autonome Kontrolle; Ereignis- vs. Zustandsnachrichten

Zusammensetzbarkeit (engl. *composability*)

- ▶ interagierende Gerätegruppen, Kompositionsproblem
- ▶ ereignis- vs. zeitgesteuerte Kommunikationssysteme

Skalierbarkeit (engl. *scalability*)

- ▶ Erweiterbarkeit (aber auch Schrumpfung), Komplexität
- ▶ Abkapselung von Zeitverhalten, Eigenständigkeit

Verlässlichkeit (engl. *dependability*)

- ▶ Fehlereingrenzung, Replikation, Replikdeterminismus
- ▶ Sicherheitshüllen, fehlereindämmende Regionen, Zertifizierung

# Kommunikation

## Anforderungen an Echtzeitkommunikation

- ▶ Protokolllatenz, Fehlererkennung; physikalische Struktur
- ▶ Unterstützung für Zusammensetzbarkeit, Flexibilität

## Flusskontrolle zur Vermeidung von Überlast

- ▶ explizit, implizit; Gegenüberstellung (HRTS)
- ▶ *send and wait* (PAR), Aktionsverzögerung, *Thrashing*

## Netzwerkarchitekturen „OSI considered harmful“?

- ▶ ISO OSI 7-Schichtenmodell, Architektur von Echtzeitnetzwerken
- ▶ Echtzeitnetzwerk, Feldbus, Rückgratnetz

## Netzzugangsprotokolle zur Vergabe des Betriebsmittels „Bus“

- ▶ Kommunikationsmedium, Charakteristiken des Übertragungskanal
- ▶ CSMA (CD/CA), *Token*, *Minislotting*, *Master/Slave*, TDMA