

# Echtzeitsysteme

## Struktureller Aufbau von Echtzeitanwendungen

Lehrstuhl Informatik 4

03. November 2011

## Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Einplanungseinheit
  - Elemente einer Echtzeitanwendung
  - Ausführungsstränge und Arbeitsaufträge
- 3 Ablaufsteuerung
  - Verwaltungsgemeinkosten
  - Trennung von Belangen
  - Grundsätzliche Verfahren
- 4 Zeitparameter
  - Zeitpunkte und Zeitintervalle
- 5 Planbarkeit
  - Zulässigkeit und Gültigkeit
  - Optimalität

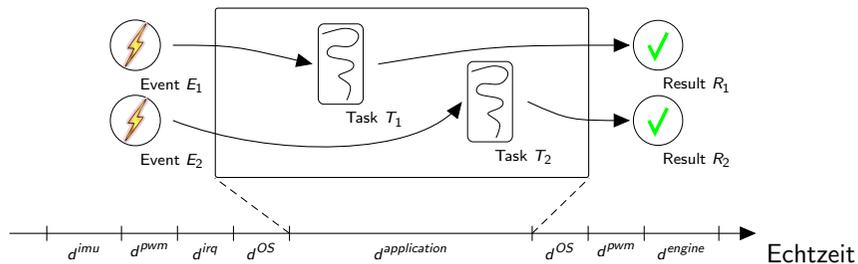
## Fragestellungen

- Was sind die grundlegenden Bestandteile einer Echtzeitanwendung?
  - Was ist eine **Aufgabe**, was ein **Ereignis** und was ein **Arbeitsauftrag**?
- Wie bildet man Aufgaben auf das kontrollierende Rechensystem ab?
  - Wie funktioniert die **Ablaufsteuerung**?
  - Welche **Kosten** verursacht sie?
- Wie hängen das physikalische Objekt und die Echtzeitanwendung zeitlich zusammen?
  - Welche grundlegenden **Zeitparameter** gibt es?
  - Wie hängen **Auslösezeit**, **Termin** und **Ausführungszeit** zusammen?
- Was versteht man unter dem Begriff **Planbarkeit**?
  - Wie stellt man die Rechtzeitigkeit einer Echtzeitanwendung sicher?

## Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Einplanungseinheit
  - Elemente einer Echtzeitanwendung
  - Ausführungsstränge und Arbeitsaufträge
- 3 Ablaufsteuerung
  - Verwaltungsgemeinkosten
  - Trennung von Belangen
  - Grundsätzliche Verfahren
- 4 Zeitparameter
  - Zeitpunkte und Zeitintervalle
- 5 Planbarkeit
  - Zulässigkeit und Gültigkeit
  - Optimalität

## Strukturelle Elemente einer Echtzeitanwendung



- Echtzeitanwendungen bestehen aus **Aufgaben  $T_i$**  (engl. *tasks*).
- Aufgaben werden durch **Ereignisse  $E_i$**  (engl. *events*) aktiviert.
- Aufgaben stellen **Ergebnisse  $R_i$**  (engl. *results*) bereit.

## Aufgabe (engl. *task*)

Sichtweise: **zeitgesteuerte Systeme**

*A task is the execution of a sequential program. It starts with reading of the input data and of the internal state of the task, and terminates with the production of the results and updating the internal state. [1, S. 75]*

Sichtweise: **ereignisgesteuerte Systeme**

*We call each unit of work that is scheduled and executed by the system a **job** and a set of related jobs which jointly provide some system function a **task**. [2, S. 26]*

*A real-time **task** is an executable entity of work which, at a minimum, is characterized by a worst case execution time and a time constraint. [4, S. 13]*

## Einfache und komplexe Aufgaben

**einfache Aufgabe** (engl. *simple task*) ohne Synchronisationspunkt

- läuft durch, ohne zu blockieren
- unabhängig von der Bearbeitung anderer Aufgaben
- ist von wichtigeren Aufgaben ggf. verdrängbar

**komplexe Aufgabe** (engl. *complex task*) mit Synchronisationspunkt

- erwartet die Zuteilung von Betriebsmitteln
  - wiederverwendbare und/oder konsumierbare BM
- hängt ab von der Bearbeitung anderer Aufgaben

## Ereignis (engl. *event*)

*An **event** is a change of state, occurring at an instant. [3, S. 10]*

Ein Ereignis ist ...

**bestimmt**, falls sein Auftreten als Funktion der physikalischen Zeit beschrieben werden kann, und

**ungewiss**, falls dies nicht zutrifft.

Ereignisse lösen (engl. *trigger*) **Arbeitsaufträge** aus:

**event trigger** Ereignisse werden von **Zustandsänderungen** in der physikalischen Umwelt oder dem kontrollierenden Rechensystem abgeleitet.

**time trigger** Ereignisse rühren ausschließlich vom **Vorranschreiten der physikalischen Zeit** her.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Das Vorranschreiten der Zeit stellt natürlich auch eine Zustandsänderung in der physikalischen Umwelt dar.

## Arbeitsauftrag (engl. *job*)

We call each unit of work that is scheduled and executed by the system a *job* and a set of related jobs which jointly provide some system function a *task*. [2, S. 26, s. Folie 3-6]

A *job* is an instance of a *task*. [4, S. 26, s. Folie 3-6]

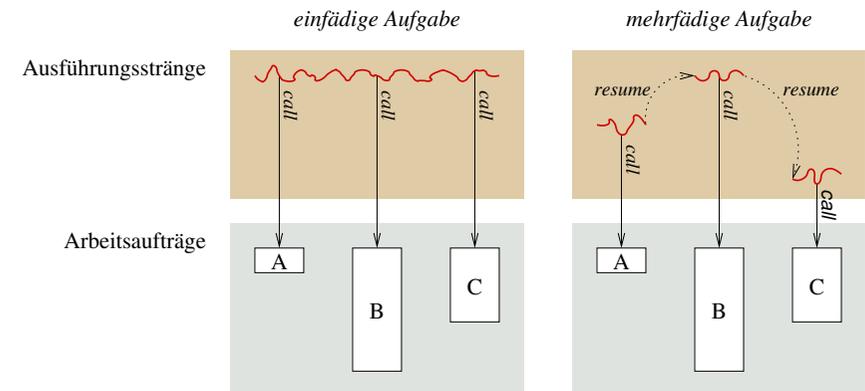
Tritt das Ereignis  $E_i$  ein und aktiviert die Aufgabe  $T_i$ , werden einer oder mehrere *Arbeitsaufträge*  $J_{i,j}$  dieser Aufgabe ausgelöst.

Einplanungseinheit ist der Arbeitsauftrag und nicht der Faden, weil. . .

- die rechtzeitige Fertigstellung von Arbeitsaufträgen zu garantieren ist
- alle Arbeitsaufträge von nur einem Faden ausgeführt werden könnten
- bei einfädigen Systemen Fadeneinplanung irrelevant und sinnlos ist

## Ausführungsstränge und Arbeitsaufträge

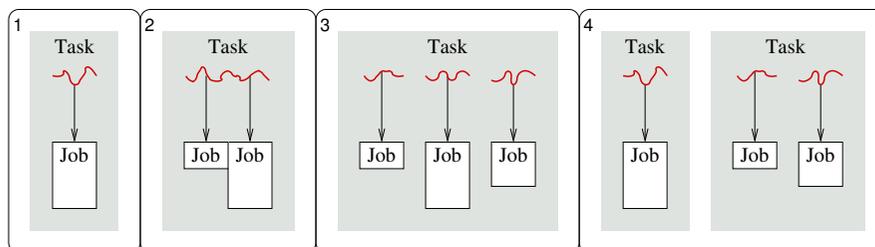
Dualität von Betriebssystemstrukturen



- die Arbeitsaufträge A, B und C sind Prozeduren (der Anwendung)
- die Prozeduren werden nacheinander aufgerufen bzw. aktiviert
  - alle von einem Faden oder jede von einem eigenen Faden

## Aufgabe vs. Arbeitsauftrag vs. Faden

Konfigurationsbeispiele für jeweils ein Rechensystem



- 1 eine einfädige Aufgabe, ein Arbeitsauftrag
  - häufig verwendete Zuordnung (vgl. Folie 3-9, [4, S. 26])
- 2 eine einfädige Aufgabe, zwei Arbeitsaufträge
- 3 eine mehrfädige Aufgabe, drei Arbeitsaufträge
  - ggf. jeder Arbeitsauftrag/Faden mit eigenem Adressraum
- 4 zwei Aufgaben (ein- und mehrfädig), drei Arbeitsaufträge
  - ggf. jede Aufgabe mit eigenem Adressraum

## Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Einplanungseinheit
  - Elemente einer Echtzeitanwendung
  - Ausführungsstränge und Arbeitsaufträge
- 3 Ablaufsteuerung
  - Verwaltungsgemeinkosten
  - Trennung von Belangen
  - Grundsätzliche Verfahren
- 4 Zeitparameter
  - Zeitpunkte und Zeitintervalle
- 5 Planbarkeit
  - Zulässigkeit und Gültigkeit
  - Optimalität

## Einplanung als zweiphasiger Prozess

### Phase 1: Aufgaben/Arbeitsaufträge $\mapsto$ Fäden

- Abbildung erfolgt **statisch** während der Entwicklung
- impliziert **Latenzen** durch **Sequentialisierung**
- entspricht einer **Allokation** von Betriebsmitteln
  - Fäden können hier als Betriebsmittel aufgefasst werden
- oft wird eine 1:1-Zuordnung zwischen Arbeitsaufträgen und Fäden angenommen

### Phase 2: Fäden $\mapsto$ Prozessor

- Nutzung des Prozessors im zeitlichen Mehrfachbetrieb
  - meist gibt es mehr Fäden als Prozessoren
- ist als **Einplanung** (engl. *scheduling*) bekannt
- Abbildung erfolgt **statisch** oder **dynamisch**
  - statisch  $\leadsto$  der komplette Ablauf wird vorab festgelegt
  - dynamisch  $\leadsto$  der Prozessor wird zur Laufzeit zugeteilt

## Ausführungsstrang

Physikalische Einheit der Einplanung (engl. *unit of scheduling*)

Abstraktion (des Betriebssystems) von einem beliebigen Programm in Abarbeitung bzw. Ausführung ist der **Prozess**

- im Prozess existieren ggf. mehrere Ausführungsstränge gleichzeitig
  - nebenläufiges Programm (engl. *concurrent program*)
  - durchzogen mit mehr als einen **Programmfaden** (engl. *thread*)
- der Kontext eines Fadens manifestiert sich im **Prozessorstatus**
  - physisch die Inhalte der Arbeits- und Statusregister der CPU
  - ggf. erweitert um Segment-/Seitendeskriptoren von MMU bzw. TLB
- Einlastung (engl. *dispatching*) eines Fadens bedeutet **Kontextwechsel**

### Prozessinstanz

Ein- oder mehrfädiges Programm, mit oder ohne eigenem Adressraum — oder aber bloß „Prozeduraktivierung“ eines übergeordneten Programms, bei kooperativer Einplanung und Verzicht auf Synchronisationspunkte.

## Verwaltungsgemeinkosten (engl. *overhead*)

Eine Frage der Repräsentation von Aufgabe und Arbeitsauftrag

- 1 einfädige Aufgabe  $\leadsto$  **fliegengewichtig**
  - $O(\text{Prozeduraufruf})$
  - Auf- und Abbau vom Aktivierungsblock (engl. *activation record*)
- 2 mehrfädige Aufgabe
  - 1 gemeinsamer Adressraum  $\leadsto$  **federgewichtig**
    - $O(\text{Fadenwechsel}) + O(1.)$
    - Austausch der Inhalte von Arbeits-/Statusregister der CPU
  - 2 separierter Betriebssystemkern  $\leadsto$  **leichtgewichtig**
    - $O(\text{Systemaufruf}) + O(2.1.)$
    - Behandlung der synchronen Programmunterbrechung (engl. *trap*)
  - 3 getrennte Adressräume  $\leadsto$  **schwergewichtig**
    - $O(\text{Adressraumwechsel}) + O(2.2.)$
    - Löschen/**Laden** vom Zwischenspeicher (engl. *cache*) der MMU

- bis auf  $O(2.3)$  haben alle anderen Fälle konstanten Aufwand

## Verdrängbare Aufgabe

Unterbrechung und Wiederaufnahme der Bearbeitung eines Arbeitsauftrags

Jobs, die ablaufen, können **Verdrängung** (engl. *preemption*) erleiden

- dem Faden des laufenden Arbeitsauftrags wird die CPU entzogen:
  - 1 eine asynchrone Programmunterbrechung (engl. *interrupt*) tritt auf
  - 2 der unterbrochene Faden wird als laufbereit (erneut) eingeplant
  - 3 ein anderer laufbereiter Faden wird ausgewählt und eingelastet
- eine Systemfunktion, die Bedingungen zum korrekten Ablauf stellt:
  - asynchrone Programmunterbrechungen müssen möglich sein
  - die Behandlungsroutine muss den Planer (engl. *scheduler*) aktivieren
  - der Planer muss verdrängend arbeiten (engl. *preemptive scheduling*)
  - mindestens ein anderer laufbereiter Faden muss zur Verfügung stehen

Verdrängung ist als **nicht-funktionale Systemeigenschaft** anzusehen

- die an anderen Programmstellen Synchronisationsbedarf impliziert
- die transparent für die betroffene Aufgabe sein muss

## Verdrängbare Aufgabe (Forts.)

Verarbeitung der Ausführungsstränge frei von Seiteneffekten

**Transparenz** (engl. *transparency*) von Verdrängung meint zweierlei:

- ① der Zustand eines unterbrochenen Fadens ist invariant
  - erfordert Sicherung und Wiederherstellung des Prozessorstatus
  - Maßnahmen zur **Einlastung** (engl. *dispatching*) von Fäden
- ② die verzögerte Ausführung des Fadens verletzt keine Fristen
  - fordert Vergabe, Überwachung und Einhaltung von Dringlichkeiten
  - jeder Faden ist von statischer/dynamischer Priorität (engl. *priority*)
  - Maßnahmen zur **Einplanung** (engl. *scheduling*) von Fäden

- einfache nicht-verdrängbare Aufgaben können auf 1. verzichten
  - einfache verdrängbare oder komplexe jedoch nicht
- für Echtzeitsysteme ist 2. ggf. sogar verzichtbar
  - sofern die Umgebung keine harten Echtzeitbedingungen vorgibt

## Trennung von Belangen

Planung des zeitlichen Ablaufs und Abfertigung

**Einplanung** (engl. *scheduling*)  $\mapsto$  **Strategie**

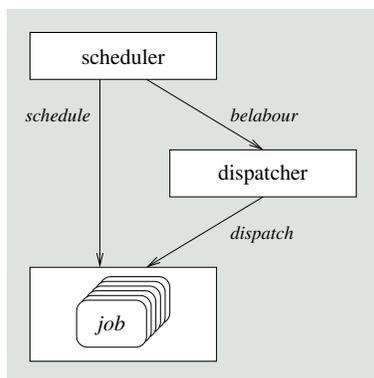
- Erstellung des Ablaufplans von Arbeitsaufträgen
  - Festlegung einer Einlastungsreihenfolge
- in Bezug auf die Aufgabenbearbeitung geschieht dies:
  - entkoppelt** (engl. *off-line*)  $\leadsto$  statisch, vor Laufzeit
  - gekoppelt** (engl. *on-line*)  $\leadsto$  dynamisch, zur Laufzeit<sup>2</sup>

**Einlastung** (engl. *dispatching*)  $\mapsto$  **Mechanismus**

- Abarbeitung des Ablaufplans von Arbeitsaufträgen
  - Umsetzung der Einplanungsentscheidungen
- ist immer gekoppelt mit der Aufgabenbearbeitung
  - Ablaufpläne können nur *online* befolgt werden

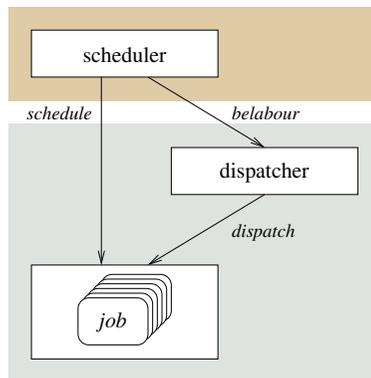
<sup>2</sup>Vorlage ist ggf. ein vor Beginn der Aufgabenbearbeitung statisch erstellter Ablaufplan, der während der Aufgabenbearbeitung dynamisch fortgeschrieben wird.

## Einplanung und Einlastung



gekoppeltes System

- zeit- und örtlich gekoppelt
  - zur Laufzeit
  - integriert in einem System
    - auf einem Rechner



entkoppeltes System

- zeit- oder örtlich entkoppelt
  - vor und zur Laufzeit
  - separiert in zwei Systeme
    - ggf. auf zwei Rechnern

## Einplanungszeitpunkte

Adaptierbarkeit (engl. *adaptability*) vs. Vorhersagbarkeit (engl. *predictability*)

**on-line scheduling (zur Laufzeit)**, kommt ohne *à priori* Wissen aus

- einzige Option bei unbekannter zukünftiger Auslastung
  - Lastparameter sind erst zur Joblaufzeit bekannt
- die getroffenen Entscheidungen sind häufig nur suboptimal
  - eingeschränkte Fähigkeit, Betriebsmittel maximal zu nutzen
- ermöglicht/unterstützt jedoch ein **flexibles System**

**off-line scheduling (vor Laufzeit)**, benötigt *à priori* Wissen

- Voraussetzung ist ein **deterministisches System**, d.h.:
  - alle Lastparameter sind vor Joblaufzeit bekannt
  - ein fester Satz von Systemfunktionen ist gegeben
- zur Laufzeit ist kein **NP-schweres Problem** mehr zu lösen
  - d.h. einen Ablaufplan zu finden, der alle Task/Job-Fristen einhält
- Änderungen am System bedeuten Neuberechnung des Ablaufplans
  - dies gilt für alle Änderungen an Software *und* Hardware

## Grundsätzliche Verfahren

Vorangetrieben durch interne oder externe Ereignisse

**taktgesteuert** (engl. *clock-driven*, auch *time-driven*) ✓

- Einlastung nur zu festen Zeitpunkten
  - vorgegeben durch das Echtzeitrechensystem
- statische (entkoppelte) Einplanung

**reihum gewichtet** (engl. *weighted round-robin*)

- Echtzeitverkehr in Hochgeschwindigkeitsnetzen
  - im Koppelnetz (engl. *switched network*)
- untypisch für die Einplanung von CPU-Jobs

**vorranggesteuert** (engl. *priority-driven*, auch *event-driven*) ✓

- Einlastung zu Ereigniszeitpunkten
  - vorgegeben durch das kontrollierte Objekt
- dynamische (gekoppelte) Einplanung

## Taktsteuerung

Zeitgesteuertes (engl. *time-triggered*) System

Einlastungszeitpunkte von Arbeitsaufträgen wurden *à priori* bestimmt

- alle Parameter aller Arbeitsaufträge sind *off-line* bekannt
  - WCET, Betriebsmittelbedarf (z.B. Speicher, Fäden, Energie), ...
- zur Laufzeit anfallende Verwaltungsgemeinkosten sind minimal

Einlastung der Arbeitsaufträge erfolgt in variablen oder festen Intervallen

- im variablen Fall wird ein Zeitgeber (engl. *timer*) mit der Länge des jeweils einzulastenden Arbeitsauftrags programmiert  $\mapsto$  WCET
  - jeder Zeitablauf bewirkt eine asynchrone Programmunterbrechung
  - als Folge findet die Einlastung des nächsten Arbeitsauftrags statt
- im festen Fall liefert der Zeitgeber regelmäßige Unterbrechungen
  - ein festes Zeitraster liegt über die Ausführung der Arbeitsaufträge
  - dient z.B. dem Abfragen (engl. *polling*) von Sensoren/Geräten

## Vorrangsteuerung

Ereignisgesteuertes (engl. *event-triggered*) System

Einplanung und Einlastung laufen gekoppelt ab  $\mapsto$  **Ereigniszeitpunkte**

- asynchrone Programmunterbrechungen: Hardwareereignisse
  - Zeitsignal, Bereitstellung von Sensordaten, Beendigung von E/A
- Synchronisationspunkte: ein-/mehreseitige Synchronisation
  - Schlossvariable, Semaphor, Monitor

Ereignisse haben Prioritäten, die **Dringlichkeiten** zum Ausdruck bringen

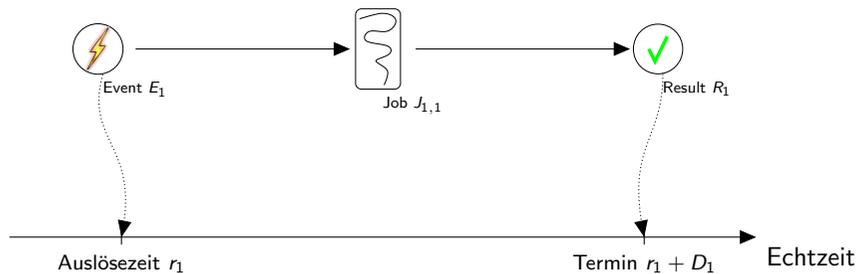
- Prioritäten werden *off-line* vergeben und ggf. *on-line* fortgeschrieben
  - Arbeitsaufträge haben eine statische oder dynamische Priorität
- die Zuteilung von Betriebsmitteln erfolgt prioritätsorientiert
  - Arbeitsaufträge höherer Priorität haben Vorrang
- Betriebsmittel (insb. CPU) bleiben niemals absichtlich ungenutzt
  - im Gegensatz zur Taktsteuerung, die Betriebsmittel brach liegen lässt

## Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Einplanungseinheit
  - Elemente einer Echtzeitanwendung
  - Ausführungsstränge und Arbeitsaufträge
- 3 Ablaufsteuerung
  - Verwaltungsgemeinkosten
  - Trennung von Belangen
  - Grundsätzliche Verfahren
- 4 Zeitparameter
  - Zeitpunkte und Zeitintervalle
- 5 Planbarkeit
  - Zulässigkeit und Gültigkeit
  - Optimalität

## Punkte auf der Echtzeitachse

### Bereitstellung und Erfüllung



- Das Ereignis  $E_i$  löst zum **Auslösezeitpunkt**  $r_i$  den Arbeitsauftrag  $J_{i,j}$  der Aufgabe  $T_i$  aus.
- Das Ergebnis  $R_i$  muss bis zum **Termin**  $D_i$  vorliegen.

## Punkte auf der Echtzeitachse (Forts.)

### Bereitstellung und Erfüllung

**Auslösezeit** (engl. *release time*) Zeitpunkt, zu dem ein Arbeitsauftrag zur Ausführung bereitgestellt wird

- ab dem Zeitpunkt ist Einlastung des betreffenden Jobs möglich
  - vorausgesetzt, gewisse Abhängigkeitsbedingungen<sup>3</sup> sind erfüllt
  - ggf. verzögern Einplanung/Koordinierung die Einlastung des Jobs

**Termin** (engl. *deadline*) Zeitpunkt, zu dem ein Arbeitsauftrag seine Ausführung beendet haben soll bzw. muss

- wird differenziert nach der Art seines Bezugszeitpunktes:
  - **relativ** (engl. *relative deadline*) zur Auslösezeit oder
  - **absolut** (engl. *absolute deadline*) als Echtzeit
- absoluter Termin = Auslösezeit  $r_i$  + relativer Termin  $D_i$
- ist je nach Anforderung weich, fest oder hart
- gibt mit dem Wert  $\infty$  keine Frist für den betreffenden Job vor

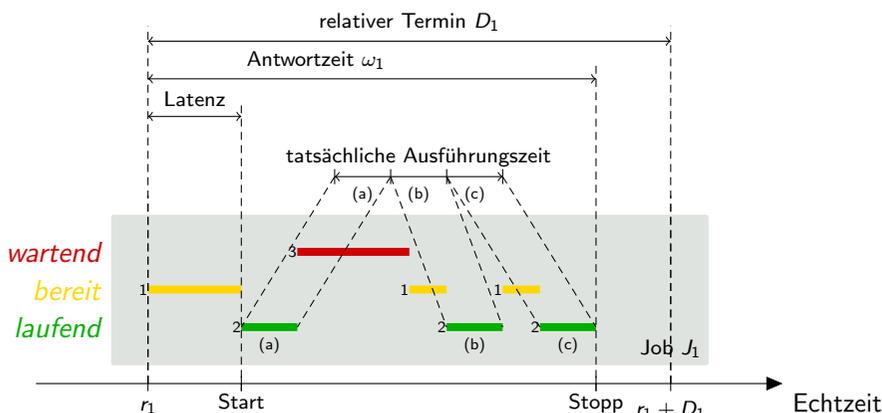
<sup>3</sup>Daten-/Kontrollfluss bzgl. kontrolliertes Objekt/anderer Arbeitsaufträge.

## Jobphasen auf der Echtzeitachse

### Ablaufzustände eines Fadens

#### Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

- (1) Einplanung, (2) Einlastung, (3) Synchronisation



## Intervalle auf der Echtzeitachse

### Ausführung und Freiraum

**Latenz** Zeitdauer zwischen Auslösezeit und dem Beginn der Abarbeitung des Arbeitsauftrags

**tatsächliche Ausführungszeit** (engl. *elapsed time*) durch den Arbeitsauftrag für die Bereitstellung des Ergebnisses beanspruchte Rechenzeit

- wird durch die **maximale Ausführungszeit**  $e_i$  der Aufgabe  $T_i$  beschränkt (engl. **worst case execution time**, WCET)
- die WCET ist prinzipiell unabhängig von anderen Arbeitsaufträgen

**Antwortzeit**  $\omega_i$  (engl. *response time*) Zeitdauer zwischen Auslösezeit und der Bereitstellung des Ergebnisses bzw. dem Terminationszeitpunkt des Arbeitsauftrags

- die **maximal erlaubte Antwortzeit** wird durch einen **relativen Termin** beschränkt: Antwortzeit  $\omega_i \leq$  relativer Termin  $D_i$

## Schlupfzeit

Der zeitliche Spielraum eines Arbeitsauftrags

**Schlupfzeit**  $slack(J_i, t)$  (engl. *slack time*) Zeitdauer zwischen dem voraussichtlichen Terminationszeitpunkt und dem Fristablauf eines sich in Bearbeitung befindlichen Arbeitsauftrags

- unter der Annahme, dass der Arbeitsauftrag nicht mehr blockiert oder unterbrochen wird

$$slack(J_i, t) = r_i + D_i - t - maturity(J_i, t)$$

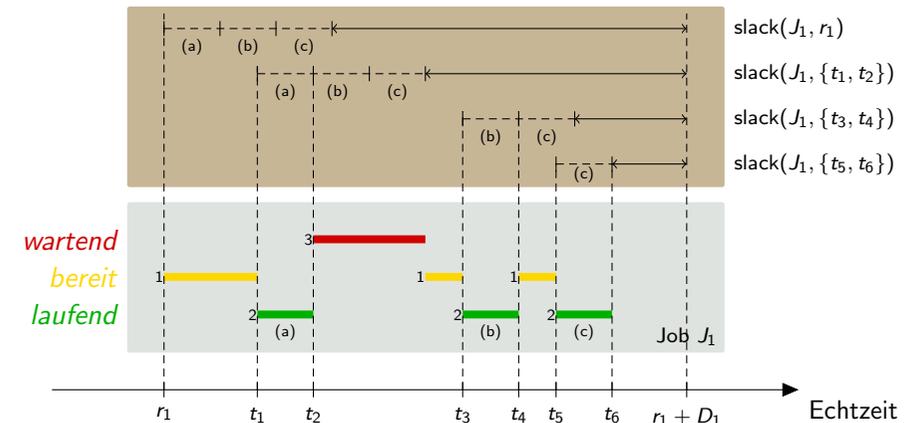
$$maturity(J_i, t) = e_i - elapsed\ time(J_i, t)$$

- Ziel: rechtzeitig, nicht möglichst schnelle Fertigstellung von Jobs
- gibt der Einplanung Spielraum zur Einlastung eines Jobs

## Schlupfzeit (Forts.)

Der zeitliche Spielraum eines Arbeitsauftrags

- in Phasen der Untätigkeit verringert sich die Schlupfzeit
- während der Ausführung bleibt die Schlupfzeit konstant



## Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Einplanungseinheit
  - Elemente einer Echtzeitanwendung
  - Ausführungsstränge und Arbeitsaufträge
- 3 Ablaufsteuerung
  - Verwaltungsgemeinkosten
  - Trennung von Belangen
  - Grundsätzliche Verfahren
- 4 Zeitparameter
  - Zeitpunkte und Zeitintervalle
- 5 Planbarkeit
  - Zulässigkeit und Gültigkeit
  - Optimalität

## Aufgabenstellung

Gegeben sei eine Menge Aufgaben  $T_i$  einer Echtzeitanwendung mit

- $D_i$  dem relativen Termin (engl. *deadline*)
- $e_i$  der maximalen Ausführungszeit (WCET)

der jeweiligen Aufgabe.

**Fragestellung:**

Ist diese Menge von Aufgaben **zulässig** (engl. *feasible* oder *schedulable*)?

## Zulässigkeit

(engl. *feasibility* oder *schedulability*)

Ein Ablaufplan ist **gültig** (engl. *valid*), falls gewisse **strukturelle Vorgaben** eingehalten werden:

- jeder CPU gleichzeitig max. ein Arbeitsauftrag zugeteilt wird
- jeder Arbeitsauftrag gleichzeitig an max. eine CPU zugeteilt wird
- kein Arbeitsauftrag vor seinem Auslösezeitpunkt eingeplant wird
- einem Arbeitsauftrag entweder seine tatsächliche oder seine maximale Ausführungszeit zugeteilt wird
- alle (un)gerichteten Abhängigkeiten eingehalten werden

Ein Ablaufplan ist **zulässig**, falls

- der Ablaufplan **gültig** ist und
- alle Arbeitsaufträge **termingerecht** eingeplant werden.

$\forall i$  : maximale Antwortzeit  $\omega_i \leq$  relativer Termin  $D_i$

## Zulässigkeit (Forts.)

Eine Menge von Aufgaben ist **zulässig** (engl. *feasible* oder *schedulable*)

- hinsichtlich eines **Einplanungsalgorithmus**,
- falls dieser Algorithmus einen zulässigen Ablaufplan erzeugt.

Die Entscheidung, ob eine Aufgabenmenge planbar ist, hängt somit

- vom verwendeten Einplanungsalgorithmus
- sowie von den **Eigenschaften der Aufgaben** ab.
  - z.B. periodisch, verdrängbar, frei von Abhängigkeiten, ...

☞ häufig schränken Algorithmen die Eigenschaften von Aufgaben ein

- dies vereinfacht die Frage der Zulässigkeit oft beträchtlich
- **aufwändige Analysen** können diese lockern/aufheben

## Klassifikation von Einplanungsalgorithmen

### Optimalität (engl. *optimality*)

Ein Einplanungsalgorithmus ist **optimal** (engl. *optimal*) für eine gewisse Klasse von Aufgaben, falls er für eine Menge solcher Aufgaben einen zulässigen Ablaufplan findet, sofern ein zulässiger Ablaufplan existiert.

- Solch ein Algorithmus stellt eine **Referenz** dar.
  - Schafft es dieser Algorithmus nicht, schafft es keiner!
- Die (generelle) Zulässigkeit einer Menge von Aufgaben
  - kann auf die Zulässigkeit für diesen Algorithmus reduziert werden,
  - sofern ein entsprechendes Kriterium existiert.

## Einhaltung von Terminen

**Taktgesteuerte Systeme**  $\leadsto$  konstruktiv

- alle Lastparameter sind à priori bekannt
- die Konstruktion einer Ablaufabelle trägt ihnen Rechnung
- Abhängigkeiten können berücksichtigt werden

☞ alle Termine werden eingehalten

- wenn eine **zulässige Ablaufabelle** erzeugt werden kann

**Vorranggesteuerte Systeme**  $\leadsto$  analytisch

- Lastparameter sind nicht vollständig bekannt
- Ablauf wird erst zur Laufzeit berechnet
- Abhängigkeiten müssen explizit gesichert werden

☞ Einhaltung von Terminen muss **explizit überprüft** werden

## Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Einplanungseinheit
  - Elemente einer Echtzeitanwendung
  - Ausführungsstränge und Arbeitsaufträge
- 3 Ablaufsteuerung
  - Verwaltungsgemeinkosten
  - Trennung von Belangen
  - Grundsätzliche Verfahren
- 4 Zeitparameter
  - Zeitpunkte und Zeitintervalle
- 5 Planbarkeit
  - Zulässigkeit und Gültigkeit
  - Optimalität

## Resümee

- Einplanungseinheit**  $\mapsto$  Prozedur, Faden und/oder Fadengruppe
- Aufgaben (*Tasks*) und Arbeitsaufträgen (*Jobs*)
  - Verwaltungsgemeinkosten ein- und mehrfädiger Aufgaben
  - Einplanung als zweiphasiger Prozess
- Ablaufsteuerung** Trennung von Belangen  $\mapsto$  Strategie & Mechanismus
- Einplanung ist die Strategie, Einlastung ist der Mechanismus
  - entkoppelt vs. gekoppelt, Taktsteuerung vs. Vorrangsteuerung
- Zeitparameter** sind Punkte und Intervalle auf der Echtzeitachse
- Auslösezeit, (absoluter) Termin
  - Antwortzeit, relativer Termin, Schlupfzeit, Ausführungszeit
- Planbarkeit** sichert Rechtzeitigkeit der Echtzeitanwendung
- gültige und zulässige Ablaufpläne
  - optimale Einplanungsalgorithmen
  - konstruktive vs. analytische Überprüfung der Planbarkeit

## Literaturverzeichnis

- [1] KOPETZ, H. :  
*Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications.*  
Kluwer Academic Publishers, 1997. –  
ISBN 0-7923-9894-7
- [2] LIU, J. W. S.:  
*Real-Time Systems.*  
Prentice-Hall, Inc., 2000. –  
ISBN 0-13-099651-3
- [3] OBERMAISSER, R. :  
*Event-Triggered and Time-Triggered Control Paradigms.*  
Springer-Verlag, 2005. –  
ISBN 0-387-23043-2
- [4] STANKOVIC, J. A. ; SPURI, M. ; RAMAMRITHAM, K. ; BUTTAZZO, G. C.:  
*Deadline Scheduling for Real-Time Systems.*  
Kluwer Academic Publishers, 1998. –  
ISBN 0-7923-8269-2