

Echtzeitsysteme

Struktureller Aufbau von Echtzeitanwendungen

Peter Wägemann

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
<https://sys.cs.fau.de/lehre/ss22/ezs/>

10. Mai 2022



Fragestellungen

- Was sind die grundlegenden Bestandteile einer Echtzeitanwendung?
 - Was ist ein Ereignis, was eine Aufgabe und was ein Arbeitsauftrag?
- Wie bildet man Aufgaben auf das kontrollierende Rechensystem ab?
 - Wie funktioniert die Ablaufsteuerung?
 - Welche Kosten verursacht sie?
- Was ist der zeitliche Zusammenhang zwischen physikalischem Objekt und Echtzeitanwendung?
 - 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?



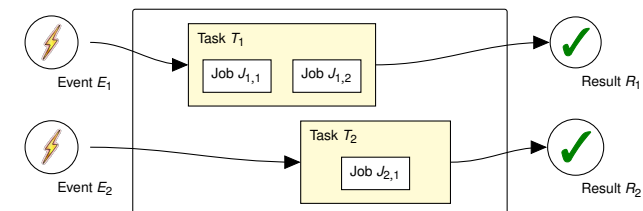
Gliederung

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



Strukturelle Elemente einer Echtzeitanwendung

Definition siehe auch [1, S. 75], [2, S. 26], [3, S. 10], [4, S. 13]



- 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
- Aus Sicht der Ausführungsumgebung untergliedern sich Aufgaben in ausführbare Arbeitsaufträge $J_{i,j}$ (engl. *jobs*)



! 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.
- Auslöser** (engl. *trigger*) für Ereignisse lassen sich unterscheiden:
 - event trigger** Ereignisse werden von **Zustandsänderungen** in der physikalischen Umwelt oder dem kontrollierenden Rechner abgeleitet
 - time trigger** Ereignisse rühren ausschließlich vom **Voranschreiten der physikalischen Zeit** her¹

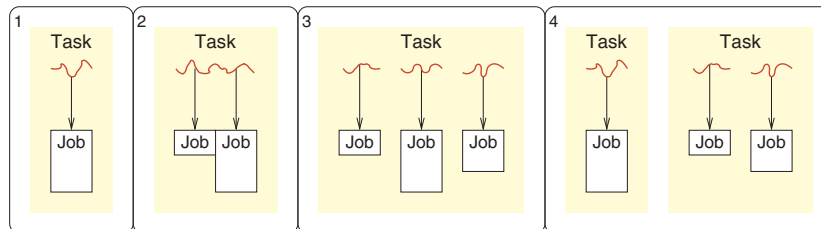
¹Das Voranschreiten der Zeit stellt natürlich auch eine Zustandsänderung in der Umwelt dar.

! Aufgabe (engl. *task*) und 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]

- Tritt das Ereignis E_i ein und aktiviert die **Aufgabe** T_i , werden einer oder mehrere **Arbeitsaufträge** $J_{i,j}$ dieser Aufgabe ausgelöst.
 - **1:n Beziehung** zwischen Aufgabe und Arbeitsaufträgen
 - Arbeitsaufträge erben die temporalen Eigenschaften der Aufgabe
- Die Aufgabe ist die **Entwurfseinheit**, der Arbeitsauftrag die **Einplanungseinheit**
 - Arbeitsaufträge unterliegen der Ablaufplanung
 - Eigenschaften dieser Planung können sich zur Laufzeit dynamisch ändern

! Aufgabe vs. Arbeitsauftrag vs. Fäden (engl. *thread*)



- Abbildung auf **Fäden** (engl. *threads*) des Betriebssystems
 - Einfädige Aufgabe, ein Arbeitsauftrag ← **Regelfall!**
 - Einfädige Aufgabe, zwei Arbeitsaufträge
 - Mehrfädige Aufgabe, drei Arbeitsaufträge
 - Zwei Aufgaben (ein- und mehrfädig), drei Arbeitsaufträge

! **1:n:m Beziehung** (Aufgabe:Arbeitsaufträge:Fäden)

Gliederung

- Einplanungseinheit
 - Elemente einer Echtzeitanwendung
 - Ausführungsstränge und Arbeitsaufträge
- Ablaufsteuerung
 - Verwaltungsgemeinkosten
 - Trennung von Belangen
 - Grundsätzliche Verfahren
- Zeitparameter
 - Zeitpunkte und Zeitintervalle
- Planbarkeit
 - Zulässigkeit und Gültigkeit
 - Bewertung von Einplanungsalgorithmen
- Zusammenfassung

Ablaufsteuerung als zweiphasiger Prozess

Ablaufsteuerung

Wann wird welcher Arbeitsauftrag auf welcher Recheneinheit ausgeführt?

- 🗨️ Ziel ist die **rechtzeitige Fertigstellung** der Arbeitsaufträge
 - Einhaltung ihrer jeweiligen **Termine** (s. Folie III-2/23)

- **Phase 1:** Aufgaben/Arbeitsaufträge \mapsto Fäden (1:n:m)
 - \rightarrow Entspricht einer **räumlichen Allokation** von Betriebsmitteln (Fäden)
 - Abbildung erfolgt **statisch** zum Entwurfszeitpunkt
 - Impliziert ggf. **Latenzen** durch **Sequentialisierung**
 - 1:1-Abbildung von Arbeitsaufträgen auf Fäden typisch



Ablaufsteuerung als zweiphasiger Prozess (Forts.)

- **Phase 2:** Fäden \mapsto Prozessor/Kerne (m:l)
 - \rightarrow Zeitliche **Einplanung** (engl. *scheduling*) von Fäden
 - Nutzung des Prozessors im **zeitlichen Mehrfachbetrieb** (engl. *temporal multiplexing*) (typ. #Fäden \gg #Prozessoren/Kerne)
 - Abbildung erfolgt **offline** oder **online**
 - Offline \sim der komplette Ablauf wird vorab festgelegt
 - Online \sim der Prozessor wird zur Laufzeit zugeteilt



Zeitlicher Mehrfachbetrieb impliziert ggf. den **dynamischen Wechsel** zwischen verschiedenen Fäden \sim **zusätzlicher Aufwand**

- Mechanismus zum Abfertigen einzelner Fäden (vgl. Ausnahmebehandlung Folie III-1/17 ff)
- Strategie zur Auswahl des nächsten lafbereiten Fadens



In Echtzeitsystemen **nicht vernachlässigbar!**



Betriebssystem: Faden in Ausführung

Einheit der Einplanung (engl. *unit of scheduling*) im Betriebssystem

- 🗨️ **Abstraktion** (des Betriebssystems) von einem beliebigen Programm/Arbeitsauftrag in Ausführung ist der **Prozess**
 - Je Prozess existieren ggf. mehrere Fäden gleichzeitig
- Kontext eines Fadens manifestiert sich im **Prozessorstatus**
 - Inhalte der Arbeits- und Statusregister der CPU
 - ggf. erweitert um Segment-/Seitendeskriptoren von MMU bzw. TLB
- ⚠️ **Einlastung** (engl. *dispatching*) eines Fadens \sim **Kontextwechsel** (vgl. Unterbrechungsbehandlung III-1/19)

Prozessinstanz des Betriebssystems

Ein- oder mehrfädiges Programm, mit oder ohne eigenem Adressraum^a

^aGgf. lediglich „Prozeduraktivierung“ eines übergeordneten Programms, bei kooperativer Einplanung und Verzicht auf Synchronisationspunkte



Verwaltungsgemeinkosten (engl. *overhead*)

Unterschiede² je nach Repräsentation von Aufgabe und Arbeitsauftrag

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



²Die Landau-Notation dient hier zur Illustration der Laufzeitkomplexität/-kosten.

Verdrängbare Aufgabe

Unterbrechung und Wiederaufnahme der Bearbeitung eines Arbeitsauftrags

⚠️ Laufende Arbeitsaufträge können **Verdrängung** (engl. *preemption*) erleiden

→ Dem Faden des laufenden Arbeitsauftrags wird die CPU entzogen

- 1 Asynchrone Programmunterbrechung tritt auf (vgl. III-1/13 ff)
- 2 Unterbrochene Faden wird als **laufbereit** (erneut) **eingelant**
- 3 Ein (anderer) laufbereiter Faden wird **ausgewählt** und **eingelant**

🗨️ Verdrängung ist eine **Systemfunktion** mit Nebenbedingungen:

- Asynchrone Programmunterbrechungen sind möglich
- Behandlungsroutine aktiviert den **Planer** (engl. *scheduler*)
- Planer muss verdrängend arbeiten (engl. *preemptive scheduling*)
- Mindestens ein (anderer) laufbereiter Faden steht zur Verfügung

■ Verdrängung ist eine **nicht-funktionale Systemeigenschaft** (vgl. III-1/3)

- Impliziert an anderen Programmstellen **Synchronisationsbedarf**
- Muss **transparent** für die betroffene Aufgabe sein (siehe III-2/14)



Verdrängbare Aufgabe (Forts.)

Verarbeitung der Ausführungsstränge frei von Seiteneffekten

■ **Transparenz** (engl. *transparency*) von Verdrängung bedingt:

- 1 Zustand eines unterbrochenen Fadens ist **invariant**
 - Sicherung und Wiederherstellung des Prozessorstatus
 - Maßnahmen zur **Einlastung** (engl. *dispatching*) von Fäden
- 2 Verzögerte Ausführung des Fadens verletzt **keine Termine**
 - Vergabe, Überwachung und Einhaltung von Fristen (engl. *deadline monitoring*)
 - Zuordnung von statischer/dynamischer **Priorität** (engl. *priority*)
 - Maßnahmen zur **Einplanung** (engl. *scheduling*) von Fäden

Kostenminimierung (Komplexität von Aufgaben siehe III-2/24)

- Einfache nicht-verdrängbare Aufgaben können auf 1. verzichten
 - Einfach verdrängbare oder komplexe jedoch nicht
- Echtzeitrechensysteme können auf 2. ggf. sogar verzichten
 - Sofern die Umgebung keine **harten** Echtzeitbedingungen vorgibt



Trennung von Belangen

Planung des zeitlichen Ablaufs und Abfertigung

■ **Einplanung** (engl. *scheduling*) → **Strategie**

→ Festlegung einer Einlastungsreihenfolge

- Erstellung des Ablaufplans von Arbeitsaufträgen
- In Bezug zur Aufgabenbearbeitung:

entkoppelt (engl. *off-line*) ~ zur Entwurfszeit

gekoppelt (engl. *on-line*) ~ zur Laufzeit³

■ **Einlastung** (engl. *dispatching*) → **Mechanismus**

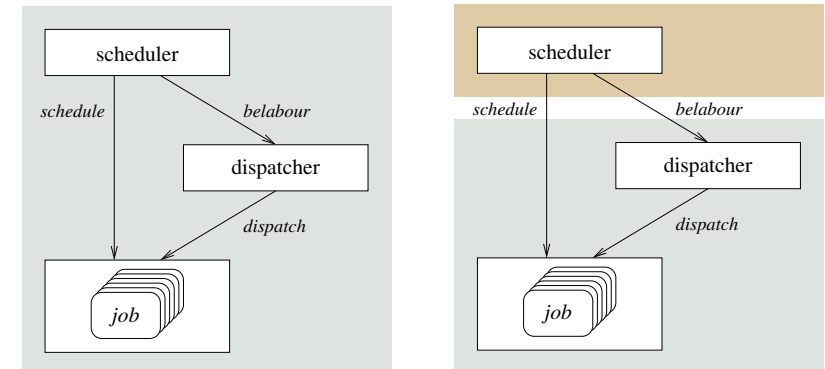
→ Umsetzung der Einplanungsentscheidungen

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



³Vorlage ist ggf. ein vor Beginn der Aufgabenbearbeitung offline erstellter Ablaufplan, der während der Aufgabenbearbeitung online fortgeschrieben wird.

Einplanung und Einlastung



Gekoppeltes System

Entkoppeltes System

■ Zeit- und örtlich gekoppelt

- Zur Laufzeit
- Integriert in einem System
 - Auf **einem** Rechner

■ Zeit- oder örtlich entkoppelt

- Vor und zur Laufzeit
- Separiert in zwei Systeme
 - Ggf. auf **zwei** Rechner



Einplanungszeitpunkte

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

- **On-line scheduling (zur Laufzeit)** \leadsto *kein à priori Wissen* nötig
 - Einzige Option bei *unbekannter* zukünftiger Auslastung
 - Lastparameter sind erst zur Joblaufzeit bekannt
 - Getroffenen Entscheidungen sind häufig nur suboptimal
 - Eingeschränkte Fähigkeit, Betriebsmittel maximal zu nutzen
 - Ermöglicht/unterstützt jedoch ein **flexibles System**
- **Off-line scheduling (zur Entwurfszeit)** \leadsto *à priori Wissen* nötig
 - Voraussetzung ist ein **vollständig bekanntes System**, d.h.:
 - Lastparameter sind vor Joblaufzeit vollständig bekannt
 - Ein fester Satz von Systemfunktionen ist gegeben
 - Zur Laufzeit ist kein **NP-schweres Problem** mehr zu lösen
 - Also einen Ablaufplan zu finden, der alle Task/Job-Fristen einhält
 - Änderungen am System bedeuten **Neuberechnung** des Ablaufplans
 - Gilt für *alle* Änderungen/Rekonfigurationen an Software *und* Hardware



Grundsätzliche Verfahren

Vorangetrieben durch interne oder externe Ereignisse

- Zeitgesteuert** (engl. *time-triggered*, auch *time-driven*) ✓
 - Einlastung nur zu *festen Zeitpunkten*
 - Vorgegeben durch das *Echtzeitrechnungssystem*
 - Offline (entkoppelte) Einplanung
- Reihum gewichtet** (engl. *weighted round robin*)
 - Echtzeitverkehr in Hochgeschwindigkeitsnetzen
 - im Koppelnetz (engl. *switched network*)
 - Untypisch für die Einplanung von Arbeitsaufträgen
- Ereignisgesteuert** (engl. *event-triggered*, auch *event-driven*) ✓
 - Einlastung zu Ereigniszeitpunkten
 - Vorgegeben durch das *kontrollierte Objekt*
 - Online (gekoppelte) Einplanung



Taktsteuerung

Zeitgesteuertes (engl. *time-triggered*) Echtzeitsystem

- ⚠ Einlastungszeitpunkte von Arbeitsaufträgen *à priori* bestimmt
 - **Alle Parameter aller Arbeitsaufträge sind off-line bekannt**
 - WCET, Betriebsmittelbedarf (z.B. Speicher, Fäden, Energie), ...
- 🗨 **Verwaltungsgemeinkosten zur Laufzeit sind minimal**
- Einlastung erfolgt in **variablen** oder **festen Intervallen**
 - **Variables Intervall** durch **Zeitgeber** (engl. *timer*) mit der Länge des jeweils einzulastenden Arbeitsauftrags programmiert \mapsto WCET (siehe Kapitel III-3)
 - Jeder Zeitablauf bewirkt eine asynchrone Programmunterbrechung
 - Als Folge findet die Einlastung des nächsten Arbeitsauftrags statt
 - **Festes Intervall** mittels regelmäßiger Unterbrechungen (Zeitgeber)
 - Festes Zeitraster liegt über die Ausführung der Arbeitsaufträge
 - Dient z.B. dem Abfragen (engl. *polling*) von Sensoren/Geräten



Vorrangsteuerung

Ereignisgesteuertes (engl. *event-triggered*) Echtzeitsystem

- ⚠ Einplanung und Einlastungszeitpunkte **vorab nicht bekannt**
 - Asynchrone Programmunterbrechungen: Hardwareereignisse
 - Zeitsignal, Bereitstellung von Sensordaten, Beendigung von E/A
 - Synchronisationspunkte: ein-/mehreseitige Synchronisation
 - Schlossvariable, Semaphor, Monitor
- 🗨 Ereignisse haben **Prioritäten** \mapsto **Dringlichkeiten**
 - Zuteilung von Betriebsmitteln erfolgt **prioritätsorientiert**
 - Arbeitsaufträge höherer Priorität haben Vorrang
 - Prioritäten werden **offline** vergeben und ggf. **online** fortgeschrieben
 - Arbeitsaufträge haben eine statische oder dynamische Priorität
 - Betriebsmittel (insb. CPU) bleiben niemals absichtlich ungenutzt
 - Im Gegensatz zur Taktsteuerung, die Betriebsmittel brach liegen lässt



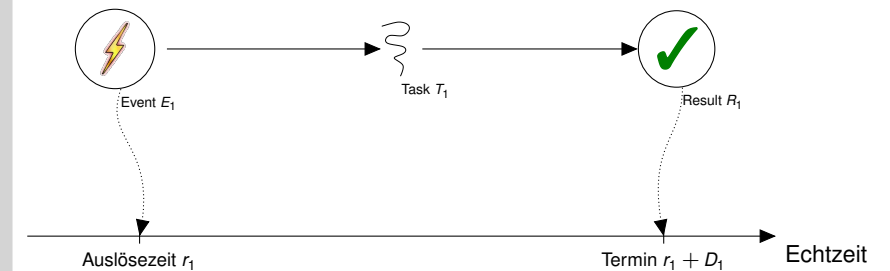
Gliederung

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



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** r_i (engl. *release time*) \mapsto Arbeitsauftrag steht zur Ausführung bereit
 - Damit ist die **Einlastung** des betreffenden Auftrags möglich
 - Voraussetzung: Abhängigkeitsbedingungen⁴ sind erfüllt
 - Ggf. verzögert Einplanung/Koordinierung die Einlastung des Jobs
- ☞ **Termin** D_i (engl. *deadline*) \mapsto Arbeitsauftrag soll/muss seine Ausführung beendet haben
 - Differenzierung nach der Art seines Bezugszeitpunktes
 - relativ** (engl. *relative deadline*) zur Auslösezeit oder
 - absolut** (engl. *absolute deadline*) als Echtzeit
 - \rightarrow absoluter Termin = Auslösezeit r_i + relativer Termin D_i
 - Je nach Anforderung weich, fest oder hart (vgl. Folie II/13)
 - Wert ∞ gibt keine Frist für den betreffenden Auftrag vor



Einschub: Einfache und komplexe Aufgaben

- ☞ **Einfache Aufgabe** (engl. *simple task*)
 - \rightarrow Ohne **Synchronisationspunkt**
 - Ausführung ist blockadefrei
 - Unabhängig vom Fortschritt anderer Aufgaben
- ⚠ **Kann lokal betrachtet werden**
 - Keine Beeinflussung von oder durch andere Aufgaben
- ☞ **Komplexe Aufgabe** (engl. *complex task*)
 - \rightarrow Mit **Synchronisationspunkt(en)**
 - Benötigt **Betriebsmitteln** (BM) (neben der CPU)
 - Fortschritt hängt von anderer Aufgaben ab
- ⚠ **Muss global betrachtet werden** \leadsto **Gesamtsystemanalyse**
 - Analyse nur im Verbund mit allen Aufgaben des Systems

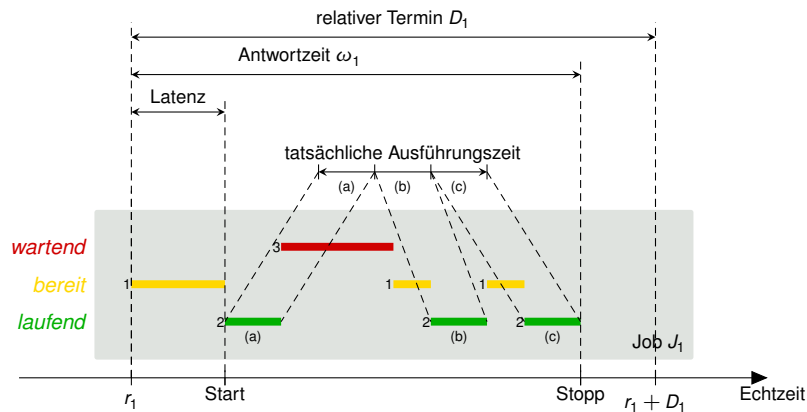


Jobphasen auf der Echtzeitachse

Ablaufzustände eines Fadens

Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

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



Intervalle auf der Echtzeitachse

Ausführung und Freiraum

- Latenz** (engl. *latency*) \mapsto Zeitdauer zwischen Auslösezeit und Beginn der Abarbeitung
- Tatsächliche Ausführungszeit** (engl. *elapsed time*) \mapsto durch den ausgeführten Arbeitsauftrag beanspruchte Rechenzeit
 - Wird durch die **maximale Ausführungszeit e_i** (engl. *worst-case execution time*, WCET) der Aufgabe T_i beschränkt
 - Die WCET ist prinzipiell unabhängig von anderen Arbeitsaufträgen
- Antwortzeit ω_i** (engl. *response time*) \mapsto Zeitdauer zwischen Auslösung und Terminierung des Arbeitsauftrags (genauer: bis das Ergebnis bereitgestellt wurde)
 - 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 $\sigma_{J_i} t$ (engl. *slack time*) Zeitdauer zwischen dem voraussichtlichen Ausführungsende und Termin eines sich in Bearbeitung befindlichen Arbeitsauftrags

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

$$\sigma_{J_i} t = r_i + D_i - t - maturity(J_i, t)$$

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

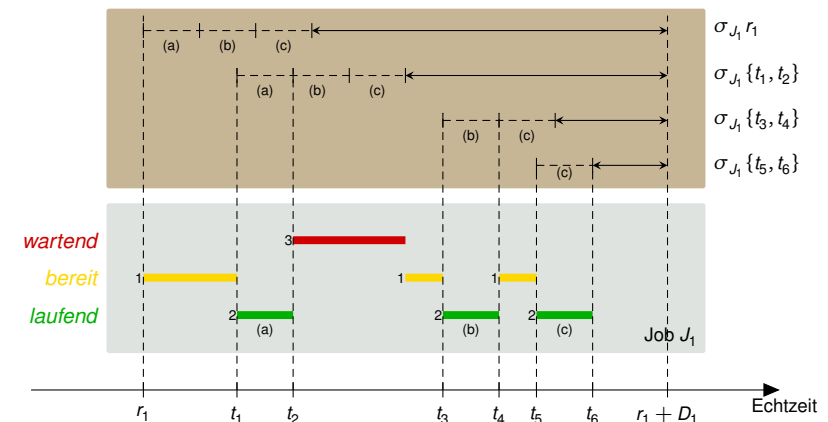
- Ziel: Rechtzeitige, nicht möglichst schnelle Fertigstellung von Aufträgen

Gib der Einplanung **Spielraum** zur Einlastung eines Auftrags

Schlupfzeit (Forts.)

Der zeitliche Spielraum eines Arbeitsauftrags

- In Phasen der Untätigkeit **verringert** sich die Schlupfzeit
- Während der Ausführung bleibt die Schlupfzeit **konstant**



Gliederung

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



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:

- 1 Zu jedem Zeitpunkt max. ein Arbeitsauftrag je CPU
- 2 Zu jedem Zeitpunkt max. eine CPU je Arbeitsauftrag
- 3 Keine Einplanung vor dem Auslösezeitpunkt
- 4 Zuteilung der tatsächliche oder maximale Ausführungszeit
- 5 Alle (un)gerichteten Abhängigkeiten werden erfüllt

- Ein Ablaufplan ist **zulässig**, falls

- 1 Der Ablaufplan **gültig** ist
- 2 Alle Arbeitsaufträge **termingerecht** eingeplant werden

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



Zulässigkeit (Forts.)

- Eine Menge von Aufgaben ist **zulässig** (engl. *feasible*)
 - hinsichtlich eines **Einplanungsalgorithmus**,
 - falls dieser Algorithmus einen zulässigen Ablaufplan erzeugt.

- Die Planbarkeit einer Menge von Aufgaben 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 Einschränkungen lockern/aufheben



Bewertung 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 Zulässigkeitskriterium existiert



Einhaltung von Terminen

Zeitgesteuerte Systeme \leadsto analytisch

- Alle Lastparameter sind à priori bekannt
- Die Konstruktion einer Ablauftabelle trägt ihnen Rechnung
- Abhängigkeiten können berücksichtigt werden

Alle Termine werden eingehalten

- Wenn eine **zulässige Ablauftabelle** erzeugt werden kann

Ereignisgesteuerte Systeme \leadsto konstruktiv

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



Resümee

- **Einplanungseinheit** \mapsto Prozedur, Faden und/oder Fadengruppe
 - Aufgaben (*Tasks*) und Arbeitsaufträgen (*Jobs*)
 - Verwaltungsgemeinkosten ein- und mehrfädiger Aufgaben
 - Einplanung als zweiphasiger Prozess
- **Ablaufsteuerung** \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



- [1] Kopetz, H. :
Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications.
First Edition.
Kluwer Academic Publishers, 1997. –
ISBN 0–7923–9894–7
- [2] Liu, J. W. S.:
Real-Time Systems.
Englewood Cliffs, NJ, USA : Prentice Hall PTR, 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



Typographische Konvention

Der erste Index gibt die Aufgabe an (z. B. D_i), der Zweite (optional) bezieht sich auf den Arbeitsauftrag (z. B. $d_{i,j}$). Exponenten zeigen verschiedene Varianten einer Eigenschaft an (z. B. T^{HI} , T^{MED} , T^{LO}). Funktionen beschreiben zeitlich variierende Eigenschaften (z. B. $P(t)$).

Eigenschaften

t (Real-)Zeit
 d Zeitverzögerung (engl. delay)

Strukturelemente

E_i Ereignis (engl. event)
 R_i Ergebnis (engl. result)
 T_i Aufgabe (engl. task)
 $J_{i,j}$ Arbeitsauftrag (engl. job) der Aufgabe T_i

Temporale Eigenschaften

Allgemein
 r_i Auslösezeitpunkt
(engl. release time)
 e_i Maximale Ausführungszeit (WCET)
 D_i Relativer Termin (engl. deadline)
 d_i Absoluter Termin
 ω_i Antwortzeit (engl. response time)
 σ_i Schlupf (engl. slack)

