Echtzeitsysteme

Struktureller Aufbau von Echtzeitanwendungen

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

`https://www4.cs.fau.de`

04. November 2016

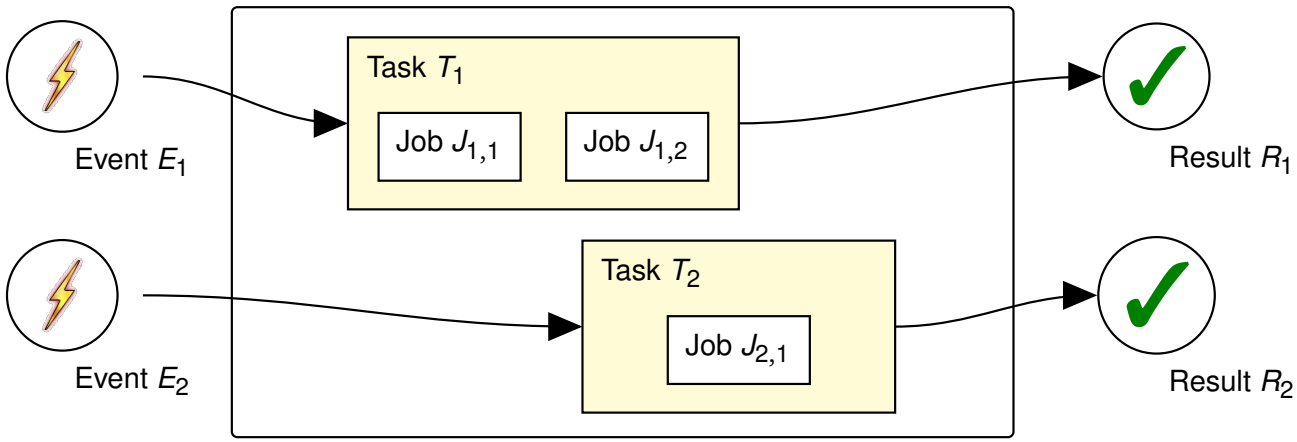
Fragestellungen

- 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

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, occuring 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 Rechensystem abgeleitet

  time trigger Ereignisse rühren ausschließlich vom Voranschreiten der physikalischen Zeit her.[1]

[1] Das 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

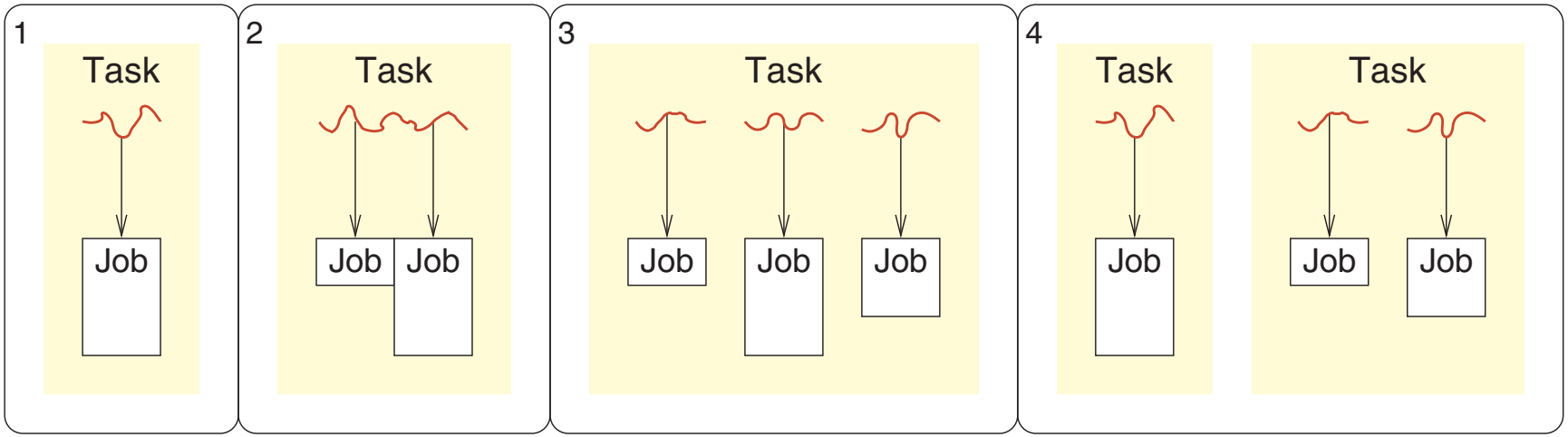
- Arbeitsaufträge erben die temporalen Eigenschaften der Aufgabe

Die Aufgabe ist die Entwurfseinheit, der Arbeitsauftrag die Einplanungseinheit

- Arbeitsaufträge unterliegen der Ablaufplanung

→ Ihre Eigenschaften können sind zur Laufzeit dynamisch ändern

Aufgabe vs. Arbeitsauftrag vs. Faden (engl. *thread*)



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

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

Gliederung

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)

→ Ablaufsteuerung dient diesem Zweck

- **Phase 1:** Aufgaben/Arbeitsaufträge ↦ Fäden (1:n:m)

→ 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)

→ Zeitliche Einplanung (engl. *scheduling*) von Fäden

- Nutzung des Prozessors im zeitlichen Mehrfachbetrieb (engl. *temporal multiplexing*) (typ. #Fäden >> #Prozessoren/Kerne)
- Abbildung erfolgt offline oder online
  - Offline $\rightsquigarrow$ der komplette Ablauf wird vorab festgelegt
  - Online $\rightsquigarrow$ der Prozessor wird zur Laufzeit zugeteilt

Zeitlicher Mehrfachbetrieb impliziert ggf. den dynamischen Wechsel zwischen verschiedenen Fäden $\rightsquigarrow$ zusätzlicher Aufwand

- Mechanismus zum Abfertigen einzelner Fäden
  (vgl. Ausnahmebehandlung Folie III-1/17 ff)
- Strategie zur Auswahl des nächsten laufbereiten 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 $\rightsquigarrow$ Kontextwechsel
(vgl. Unterbrechungsbehandlung III-1/19)

Prozessinstanz des Betriebssystems

Ein- oder mehrfädiges Programm, mit oder ohne eigenem Adressraum[a].

[a] Ggf. lediglich „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 $\rightsquigarrow$ fliegengewichtig
   - $O(\mathit{Prozeduraufruf})$
   - Auf- und Abbau vom Aktivierungsblock (engl. *activation record*)
2. Mehrfädige Aufgabe

2.1 Gemeinsamer Adressraum $\rightsquigarrow$ federgewichtig
   - $O(\mathit{Fadenwechsel}) + O(1.)$
   - Austausch der Inhalte von Arbeits-/Statusregister der CPU

2.2 Separierter Betriebssystemkern $\rightsquigarrow$ leichtgewichtig
   - $O(\mathit{Systemaufruf}) + O(2.1.)$
   - Behandlung der synchronen Programmunterbrechung (engl. *trap*)

2.3 getrennte Adressräume $\rightsquigarrow$ schwergewichtig
   - $O(\mathit{Adressraumwechsel}) + O(2.2.)$
   - 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

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) eingeplant
3. Ein (anderer) laufbereiter Faden wird ausgewählt und eingelastet

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
     - – 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

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

→ Festlegung einer Einlastungsreihenfolge

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

entkoppelt (engl. *off-line*) $\rightsquigarrow$ zur Entwurfszeit
gekoppelt (engl. *on-line*) $\rightsquigarrow$ zur Laufzeit[2]

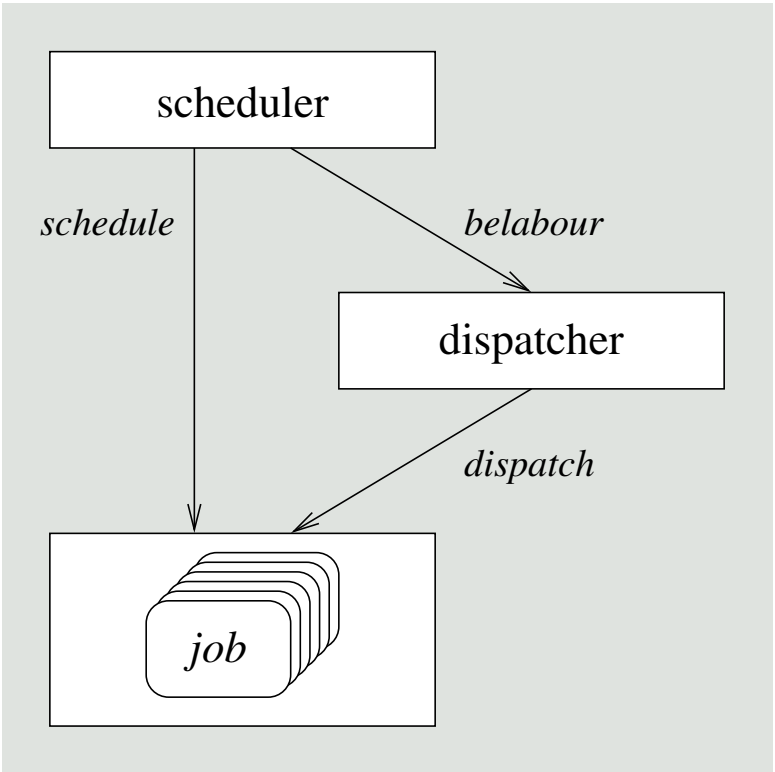
- Einlastung (engl. *dispatching*) $\mapsto$ Mechanismus

→ Umsetzung der Einplanungsentscheidungen

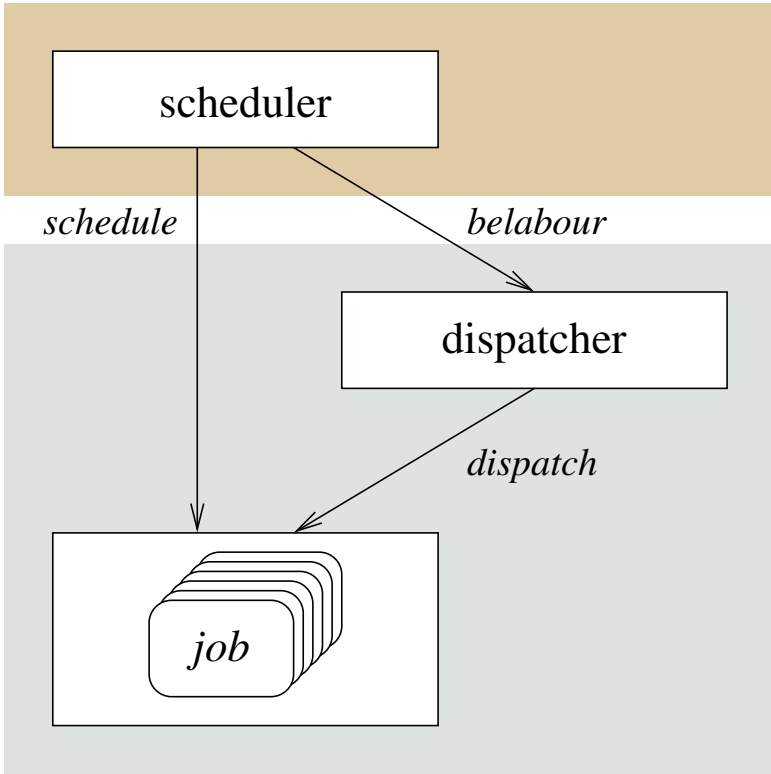
- Abarbeitung des Ablaufplans von Arbeitsaufträgen
- Ist immer gekoppelt mit der Aufgabenbearbeitung
  - Ablaufpläne können nur *online* befolgt werden

[2] Vorlage 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) $\rightsquigarrow$ 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) $\rightsquigarrow$ *à priori* Wissen nötig
  - Voraussetzung ist ein deterministisches 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

    $\rightarrow$ Einen Ablaufplan zu finden, der alle Task/Job-Fristen einhält
  - Änderungen am System bedeuten Neuberechnung des Ablaufplans
    - Gilt für alle Änderungen 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 Echtzeitrechensystem
- 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

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 ↦ 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

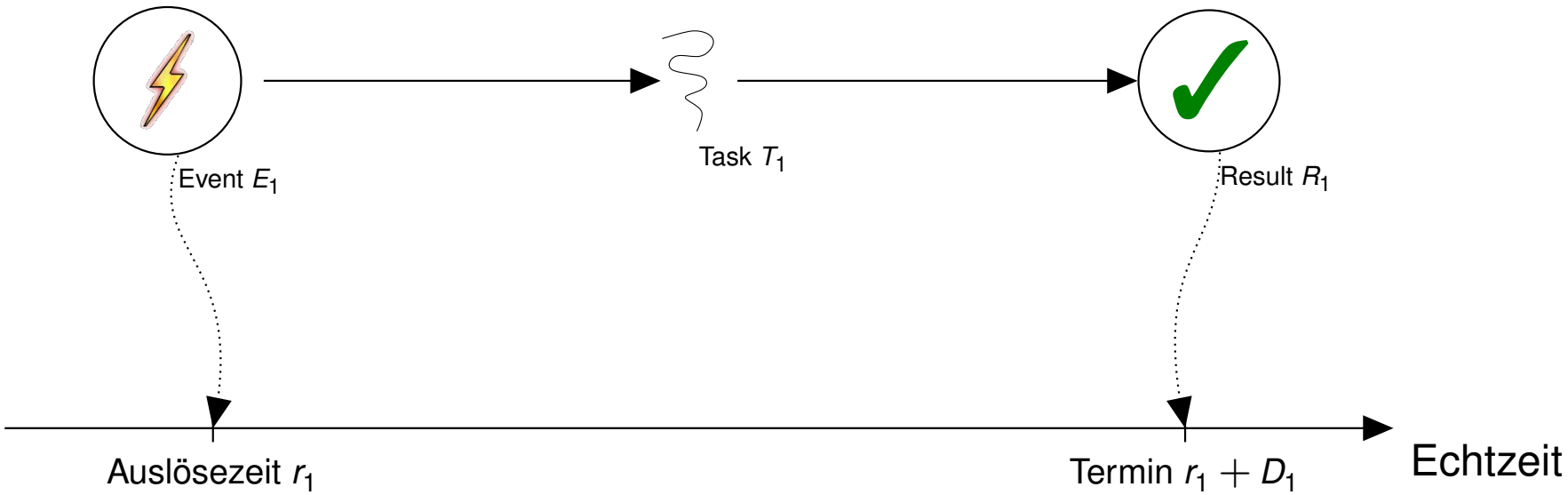
- Asynchrone Programmunterbrechungen: Hardwareereignisse
  - Zeitsignal, Bereitstellung von Sensordaten, Beendigung von E/A
- Synchronisationspunkte: ein-/mehrseitige Synchronisation
  - Schlossvariable, Semaphor, Monitor

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

Punkte auf der Echtzeitachse



- 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.)

Auslösezeit r_i (engl. *release time*) $\mapsto$ Arbeitsauftrag steht zur Ausführung bereit

- Damit ist die Einlastung des betreffenden Auftrags möglich
  - Voraussetzung: Abhängigkeitsbedingungen[3] 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/12)
  - Wert ∞ gibt keine Frist für den betreffenden Auftrag vor

[3] Daten-/Kontrollfluss bzgl. kontrolliertem Objekt/anderer Arbeitsaufträge.

Einschub: Einfache und komplexe Aufgaben

☞ Einfache Aufgabe (engl. *simple task*)

→ Ohne Synchronisationspunkt

- Ausführung ist blockadefrei
- Unabhängig vom Fortschritt anderer Aufgaben

⚠ Kann lokal betrachtet werden

- Kein Beeinflussung von oder durch andere Aufgaben

☞ Komplexe Aufgabe (engl. *complex task*)

→ Mit Synchronisationspunkt(en)

- Benötigt Betriebsmitteln
- Fortschritt hängt von anderer Aufgaben ab

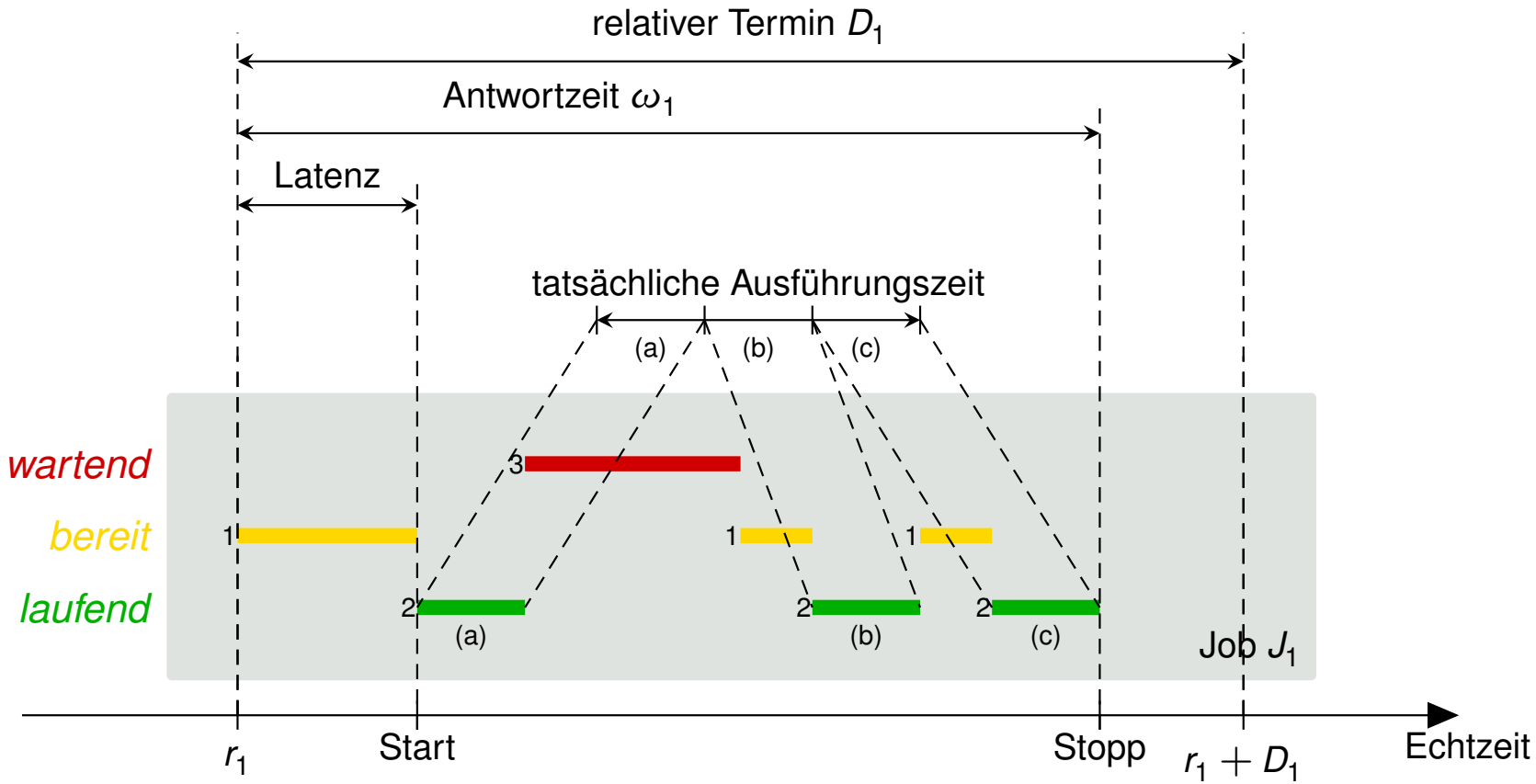
⚠ Muss global betrachtet werden

- Analyse nur im Verbund mit allen kooperierenden Aufgaben

Jobphasen auf der Echtzeitachse

Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

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



Intervalle auf der Echtzeitachse

- 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

☞ 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

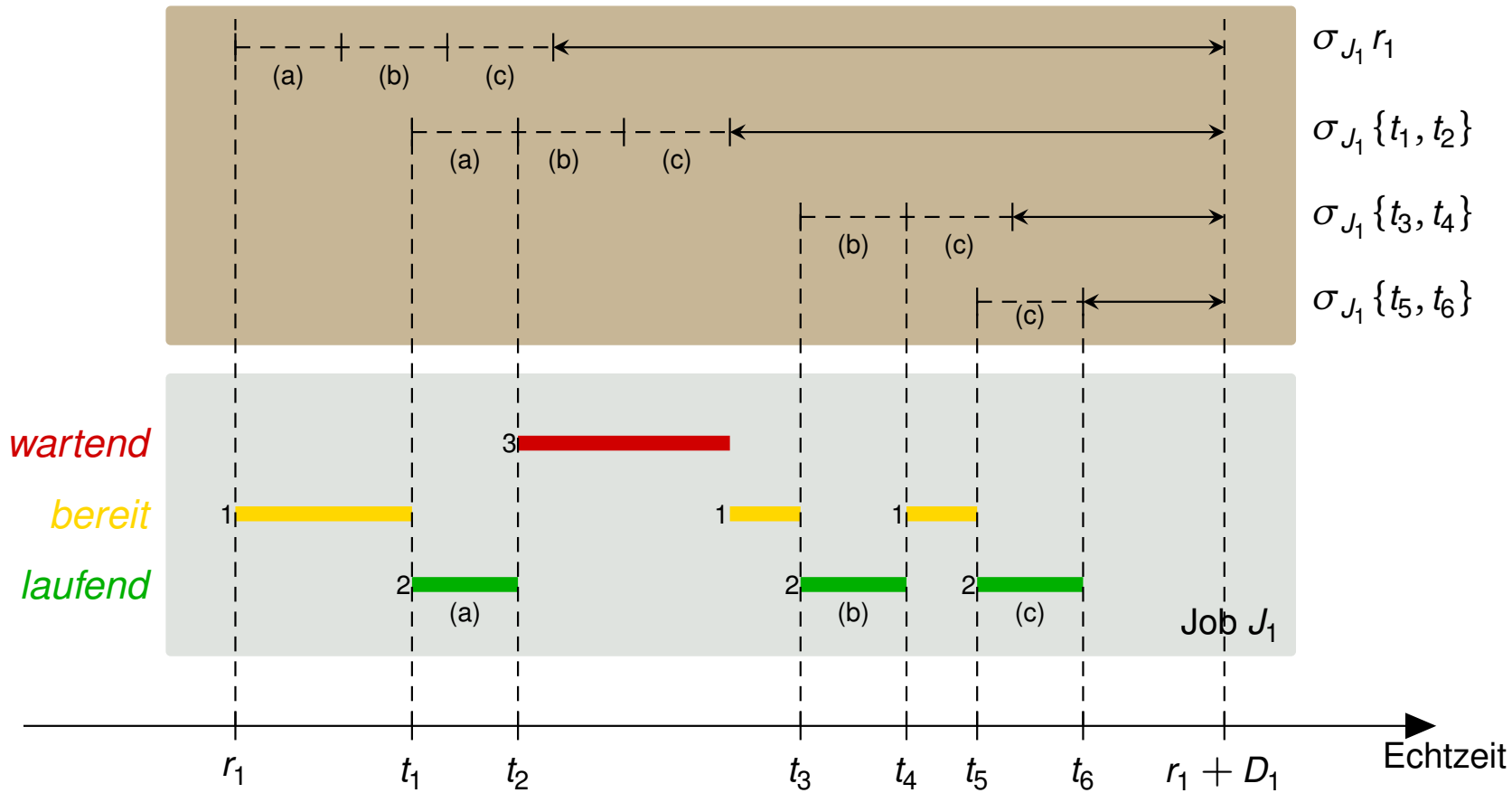
$$\begin{aligned} \sigma_{J_i} t &= r_i + D_i - t - \mathit{maturity}(J_i, t) \\ \mathit{maturity}(J_i, t) &= e_i - \mathit{elapsed\ time}(J_i, t) \end{aligned}$$

- Ziel: Rechtzeitige, nicht möglichst schnelle Fertigstellung von Aufträgen

⚠ Gibt der Einplanung Spielraum zur Einlastung eines Auftrags

Schlupfzeit (Forts.)

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



Gliederung

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

- Ein Ablaufplan ist zulässig, falls:
  - Der Ablaufplan gültig ist
  - 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 $\leadsto$ konstruktiv

- 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 $\leadsto$ 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

Resümee

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

EZS – Cheat Sheet

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)