

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
- 6 Zusammenfassung

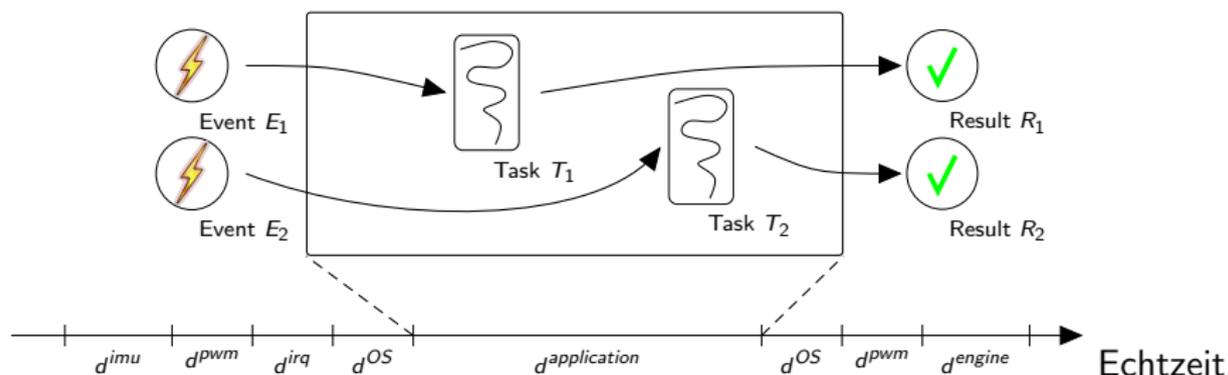
Fragestellungen

- 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
- 6 Zusammenfassung

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.¹

¹Das 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]*

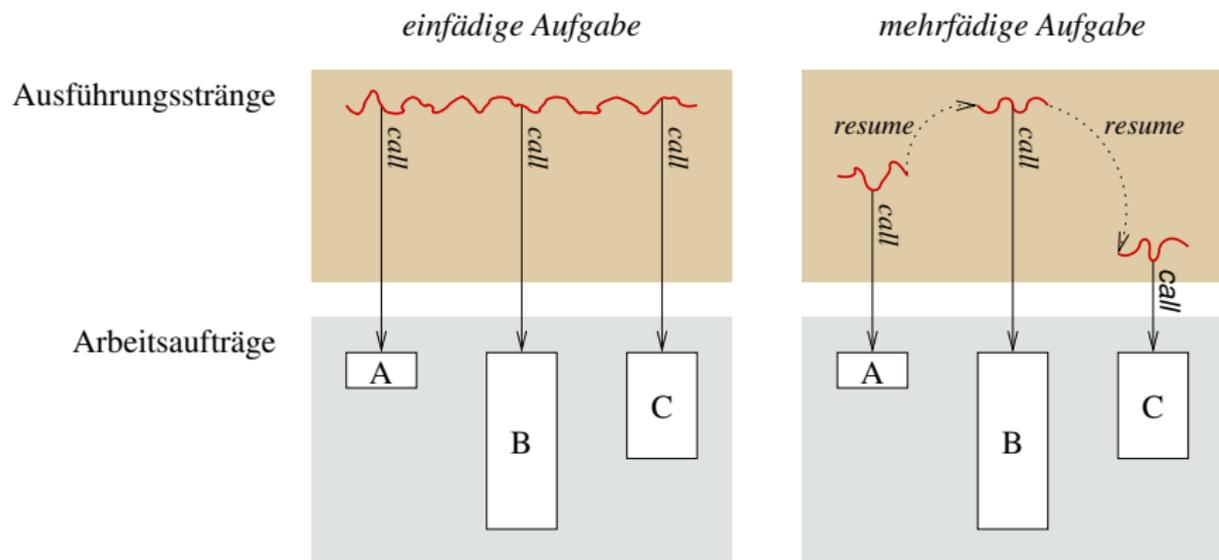
Tritt das Ereignis E_i ein und aktiviert die Aufgabe T_i , werden einer oder mehrere **Arbeitsaufträge** $J_{i,j}$ dieser Aufgabe ausgelöst.

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

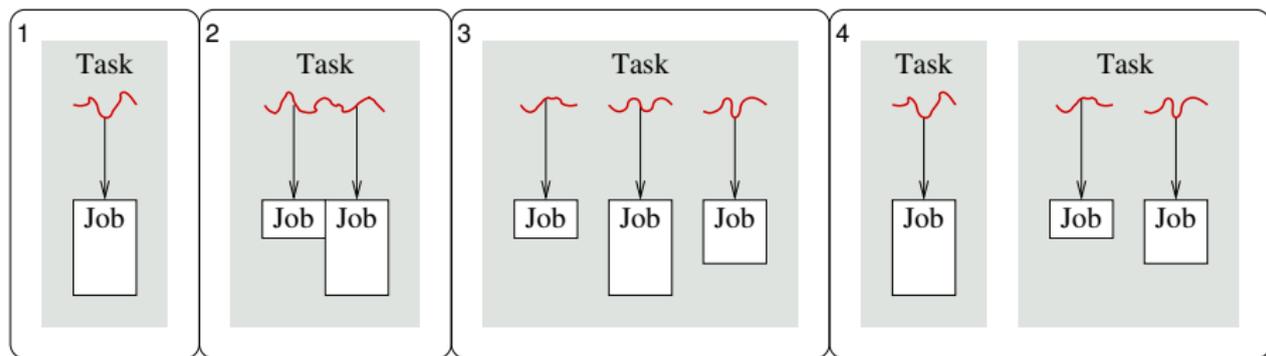
Dualität von Betriebssystemstrukturen



- 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
- 6 Zusammenfassung

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 **Programmfa**den (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**

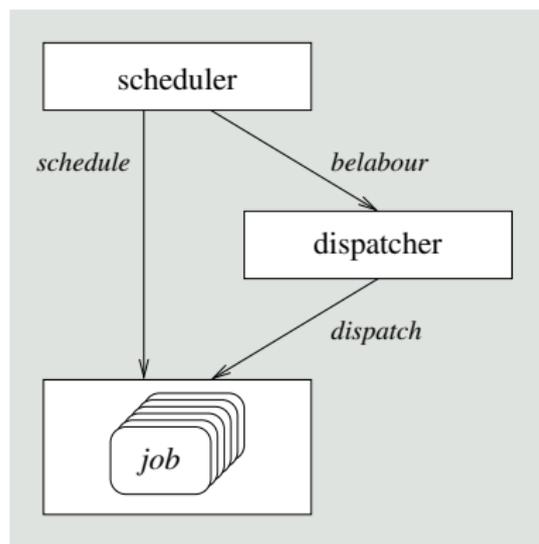
- Erstellung des Ablaufplans von Arbeitsaufträgen
 - Festlegung einer Einlastungsreihenfolge
- in Bezug auf die Aufgabenbearbeitung geschieht dies:
 - entkoppelt** (engl. *off-line*) \rightsquigarrow statisch, vor Laufzeit
 - gekoppelt** (engl. *on-line*) \rightsquigarrow dynamisch, zur Laufzeit²

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

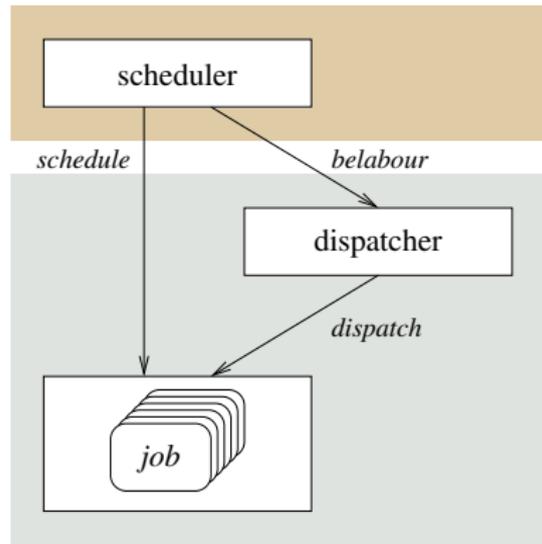
²Vorlage ist ggf. ein vor Beginn der Aufgabenbearbeitung statisch erstellter Ablaufplan, der während der Aufgabenbearbeitung dynamisch fortgeschrieben wird.

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 Rechner

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 **\mathcal{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-/mehrseitige Synchronisation
 - Schlossvariable, Semaphor, Monitor

Ereignisse haben Prioritäten, die Dringlichkeiten zum Ausdruck bringen

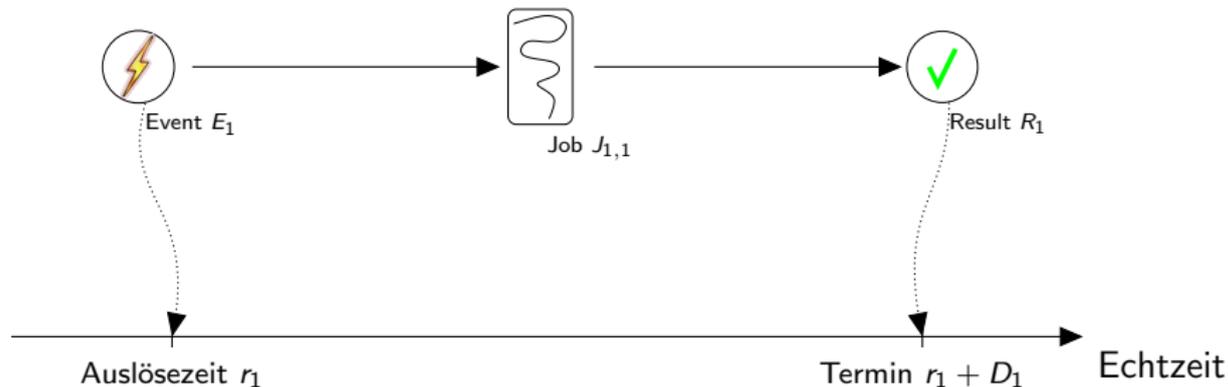
- Prioritäten werden *off-line* vergeben und ggf. *on-line* fortgeschrieben
 - Arbeitsaufträge haben eine statische oder dynamische Priorität
- die Zuteilung von Betriebsmitteln erfolgt prioritätsorientiert
 - Arbeitsaufträge höherer Priorität haben Vorrang
- Betriebsmittel (insb. CPU) bleiben niemals 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
- 6 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 (engl. *release time*) Zeitpunkt, zu dem ein Arbeitsauftrag zur Ausführung bereitgestellt wird

- ab dem Zeitpunkt ist Einlastung des betreffenden Jobs möglich
 - vorausgesetzt, gewisse Abhängigkeitsbedingungen³ 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 ∞ keine Frist für den betreffenden Job vor

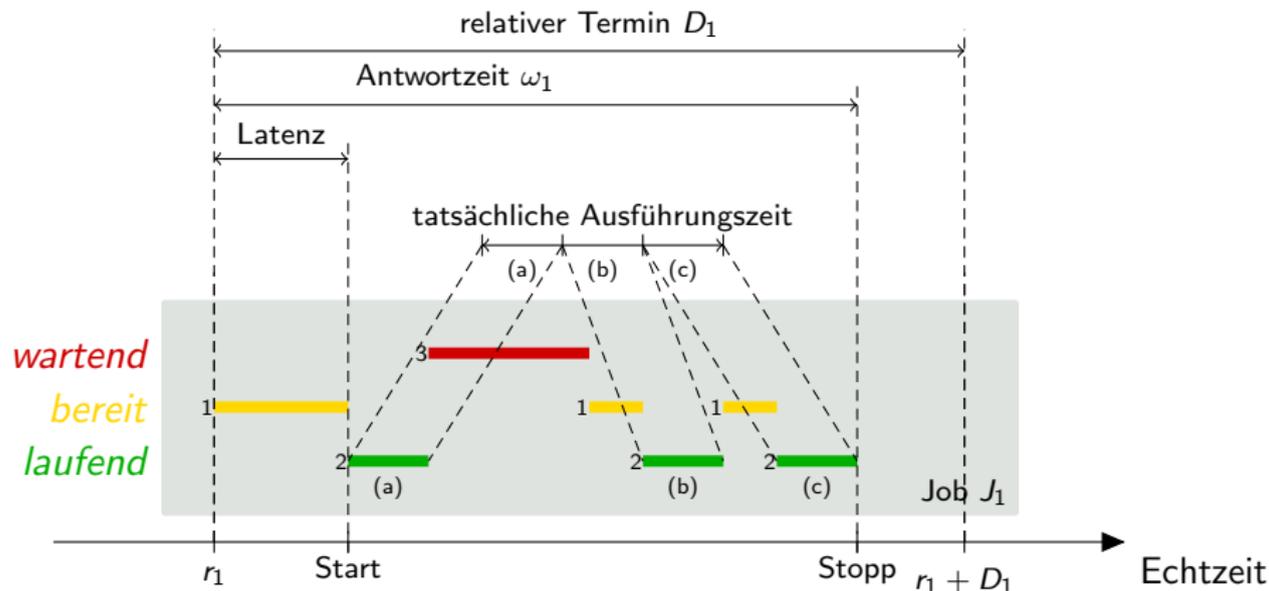
³Daten-/Kontrollfluss bzgl. kontrolliertes Objekt/anderer Arbeitsaufträge.

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 ω_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

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

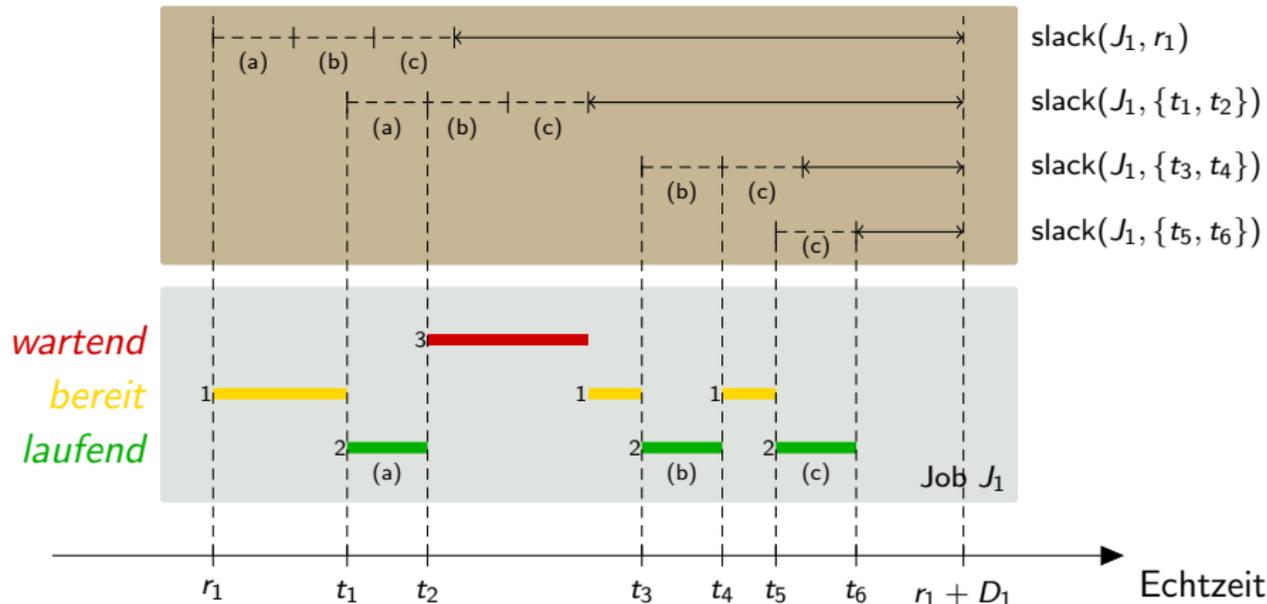
$$maturity(J_i, t) = e_i - elapsed\ time(J_i, t)$$

- Ziel: rechtzeitige, 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
- 6 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:

- 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.

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

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
- 6 Zusammenfassung

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