

Echtzeitsysteme

Struktureller Aufbau von Echtzeitanwendungen

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS18/V_EZS/

25. Oktober 2018



- Was sind die grundlegenden Bestandteile einer Echtzeitanwendung?
 - Was ist ein Ereignis, was eine Aufgabe und was ein Arbeitsauftrag?



- 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 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 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?



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

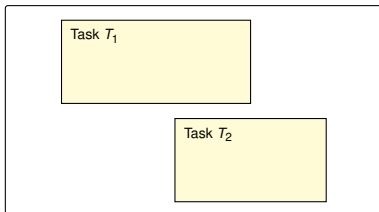
5 Zusammenfassung





Strukturelle Elemente einer Echtzeitanwendung

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



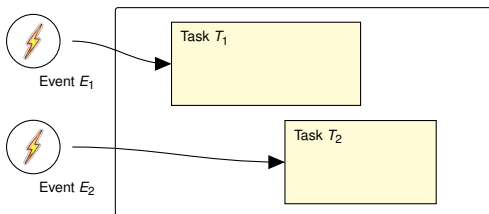
- Echtzeitanwendungen bestehen aus **Aufgaben T_i** (engl. *tasks*)





Strukturelle Elemente einer Echtzeitanwendung

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



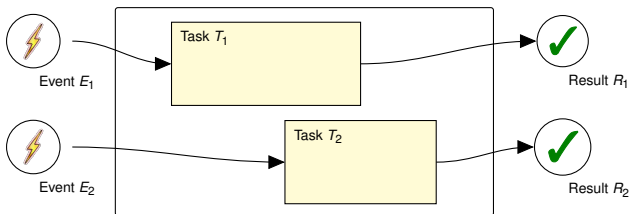
- Echtzeitanwendungen bestehen aus **Aufgaben T_i** (engl. *tasks*)
- Aufgaben werden durch **Ereignisse E_i** (engl. *events*) aktiviert





Strukturelle Elemente einer Echtzeitanwendung

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



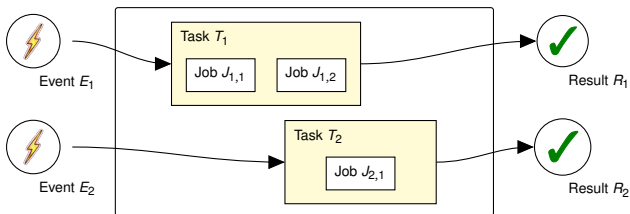
- Echtzeitanwendungen bestehen aus **Aufgaben T_i** (engl. *tasks*)
- Aufgaben werden durch **Ereignisse E_i** (engl. *events*) aktiviert
- Aufgaben stellen **Ergebnisse R_i** (engl. *results*) bereit





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.





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

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]*





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





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



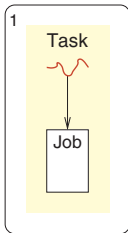
Die Aufgabe ist die **Entwurfseinheit**, der Arbeitsauftrag die **Einplanungseinheit**

- Arbeitsaufträge unterliegen der Ablaufplanung
- Ihre Eigenschaften können sich zur Laufzeit dynamisch ändern





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



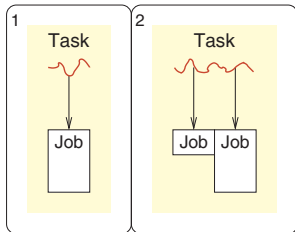
- Abbildung auf **Fäden** (engl. *threads*) des Betriebssystems

1 Einfädige Aufgabe, ein Arbeitsauftrag





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



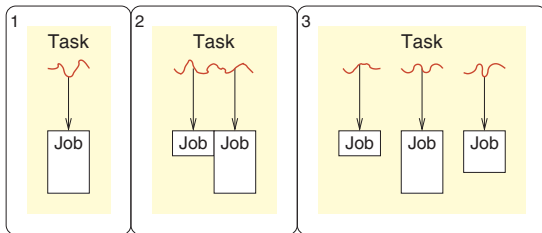
- Abbildung auf **Fäden** (engl. *threads*) des Betriebssystems

- 1 Einfädige Aufgabe, ein Arbeitsauftrag
- 2 Einfädige Aufgabe, zwei Arbeitsaufträge





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



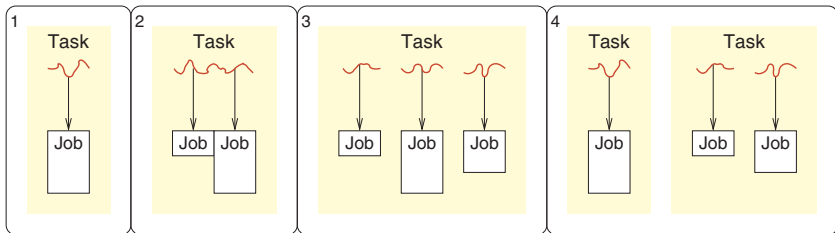
■ Abbildung auf **Fäden** (engl. *threads*) des Betriebssystems

- 1** Einfädige Aufgabe, ein Arbeitsauftrag
- 2** Einfädige Aufgabe, zwei Arbeitsaufträge
- 3** Mehrfädige Aufgabe, drei Arbeitsaufträge





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



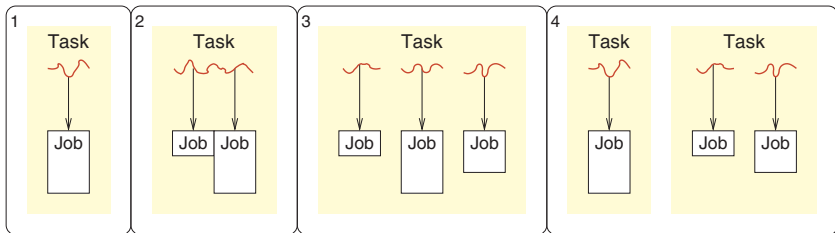
■ Abbildung auf **Fäden** (engl. *threads*) des Betriebssystems

- 1 Einfädige Aufgabe, ein Arbeitsauftrag
- 2 Einfädige Aufgabe, zwei Arbeitsaufträge
- 3 Mehrfädige Aufgabe, drei Arbeitsaufträge
- 4 Zwei Aufgaben (ein- und mehrfädig), drei Arbeitsaufträge





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)



- 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



Ablaufsteuerung

Wann wird welcher Arbeitsauftrag auf
welcher Recheneinheit ausgeführt?



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



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 $\mapsto$ 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



- **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 $\gg$ #Prozessoren/Kerne)
 - Abbildung erfolgt **offline** oder **online**
 - Offline $\leadsto$ der komplette Ablauf wird vorab festgelegt
 - Online $\leadsto$ der Prozessor wird zur Laufzeit zugeteilt



■ 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 $\gg$ #Prozessoren/Kerne)
- Abbildung erfolgt **offline** oder **online**
 - Offline $\leadsto$ der komplette Ablauf wird vorab festgelegt
 - Online $\leadsto$ der Prozessor wird zur Laufzeit zugeteilt



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

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



■ 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 $\gg$ #Prozessoren/Kerne)
- Abbildung erfolgt **offline** oder **online**
 - Offline $\leadsto$ der komplette Ablauf wird vorab festgelegt
 - Online $\leadsto$ der Prozessor wird zur Laufzeit zugeteilt



Zeitlicher Mehrfachbetrieb impliziert ggf. den **dynamischen Wechsel** zwischen verschiedenen Fäden $\leadsto$ **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!**





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





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 $\leadsto$ **Kontextwechsel**
(vgl. Unterbrechungsbehandlung III-1/19)



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 $\leadsto$ **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.



1 Einfädige Aufgabe $\rightsquigarrow$ fliegengewichtig

- $O(\text{Prozeduraufruf})$
- Auf- und Abbau vom Aktivierungsblock (engl. *activation record*)



Verwaltungsgemeinkosten (engl. *overhead*)

Eine Frage der Repräsentation von Aufgabe und Arbeitsauftrag

- 1 Einfädige Aufgabe $\rightsquigarrow$ fliegengewichtig
 - $O(\text{Prozeduraufruf})$
 - Auf- und Abbau vom Aktivierungsblock (engl. *activation record*)
- 2 Mehrfädige Aufgabe



1 Einfädige Aufgabe $\rightsquigarrow$ fliegengewichtig

- $O(\text{Prozeduraufruf})$
- Auf- und Abbau vom Aktivierungsblock (engl. *activation record*)

2 Mehrfädige Aufgabe

2.1 Gemeinsamer Adressraum $\rightsquigarrow$ federgewichtig

- $O(\text{Fadenwechsel}) + O(1.)$
- Austausch der Inhalte von Arbeits-/Statusregister der CPU



1 Einfädige Aufgabe $\leadsto$ fliegengewichtig

- $O(\text{Prozeduraufruf})$
- Auf- und Abbau vom Aktivierungsblock (engl. *activation record*)

2 Mehrfädige Aufgabe

2.1 Gemeinsamer Adressraum $\leadsto$ federgewichtig

- $O(\text{Fadenwechsel}) + O(1.)$
- Austausch der Inhalte von Arbeits-/Statusregister der CPU

2.2 Separierter Betriebssystemkern $\leadsto$ leichtgewichtig

- $O(\text{Systemaufruf}) + O(2.1.)$
- Behandlung der synchronen Programmunterbrechung (engl. *trap*)



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

2.1 Gemeinsamer Adressraum $\leadsto$ federgewichtig

- $O(\text{Fadenwechsel}) + O(1.)$
- Austausch der Inhalte von Arbeits-/Statusregister der CPU

2.2 Separierter Betriebssystemkern $\leadsto$ leichtgewichtig

- $O(\text{Systemaufruf}) + O(2.1.)$
- Behandlung der synchronen Programmunterbrechung (engl. *trap*)

2.3 getrennte Adressräume $\leadsto$ schwergewichtig

- $O(\text{Adressraumwechsel}) + O(2.2.)$
- Löschen/Laden vom Zwischenspeicher (engl. *cache*) der MMU



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

2.1 Gemeinsamer Adressraum $\leadsto$ federgewichtig

- $O(\text{Fadenwechsel}) + O(1.)$
- Austausch der Inhalte von Arbeits-/Statusregister der CPU

2.2 Separierter Betriebssystemkern $\leadsto$ leichtgewichtig

- $O(\text{Systemaufruf}) + O(2.1.)$
- Behandlung der synchronen Programmunterbrechung (engl. *trap*)

2.3 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





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) **ingeplant**
- 3 Ein (anderer) laufbereiter Faden wird **ausgewählt** und **eingelastet**





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





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) **eingepplant**
- 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)



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



- **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



■ **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



■ **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



- **Einplanung** (engl. *scheduling*) $\mapsto$ **Strategie**
 - Festlegung einer Einlastungsreihenfolge
 - Erstellung des Ablaufplans von Arbeitsaufträgen
 - In Bezug zur Aufgabenbearbeitung:
 - entkoppelt** (engl. *off-line*) $\leadsto$ zur Entwurfszeit
 - gekoppelt** (engl. *on-line*) $\leadsto$ zur Laufzeit²

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

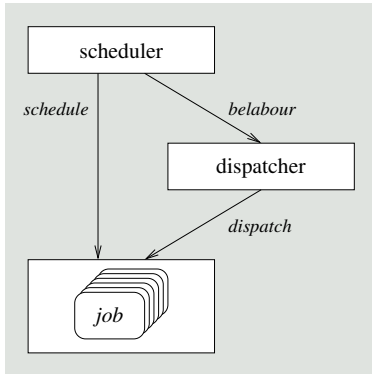


- **Einplanung** (engl. *scheduling*) $\mapsto$ **Strategie**
 - Festlegung einer Einlastungsreihenfolge
 - Erstellung des Ablaufplans von Arbeitsaufträgen
 - In Bezug zur Aufgabenbearbeitung:
 - entkoppelt* (engl. *off-line*) $\leadsto$ zur Entwurfszeit
 - gekoppelt* (engl. *on-line*) $\leadsto$ zur Laufzeit²

- **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

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

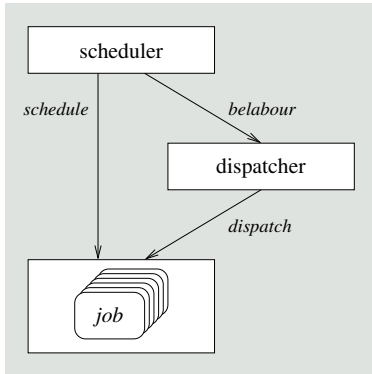




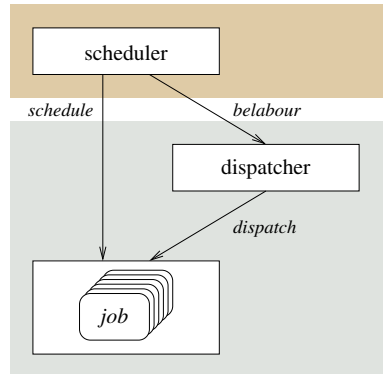
Gekoppeltes System

- Zeit- und örtlich gekoppelt
 - Zur Laufzeit
 - Integriert in einem System
 - Auf einem Rechner





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





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 **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
 - 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



Zeitgesteuert (engl. *time-triggered*, auch *time driven*)



- Einlastung nur zu festen Zeitpunkten
→ Vorgegeben durch das Echtzeitrechensystem
- Offline (entkoppelte) Einplanung



Zeitgesteuert (engl. *time-triggered*, auch *time driven*)



- Einlastung nur zu festen Zeitpunkten
→ Vorgegeben durch das Echtzeitrechensystem
- Offline (entkoppelte) Einplanung

Ereignisgesteuert (engl. *event-triggered*, auch *event driven*)



- Einlastung zu Ereigniszeitpunkten
→ Vorgegeben durch das kontrollierte Objekt
- Online (gekoppelte) Einplanung



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





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





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 $\rightarrow$ 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





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



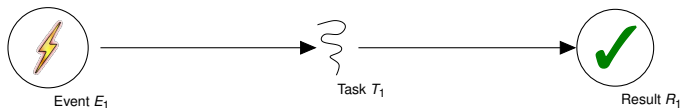
Ereignisse haben **Prioritäten** $\mapsto$ **Dringlichkeiten**

- 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

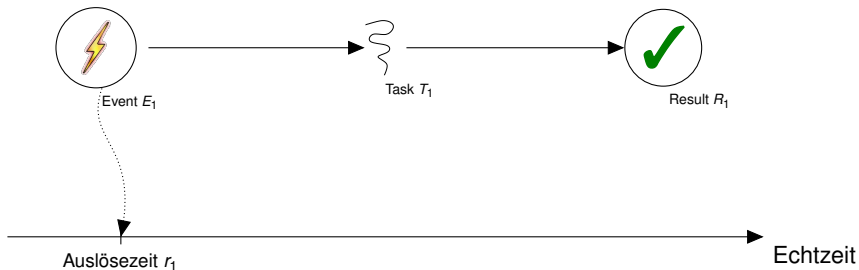


- 1 Einplanungseinheit
 - Elemente einer Echtzeitanwendung
 - Ausführungsstränge und Arbeitsaufträge
- 2 Ablaufsteuerung
 - Verwaltungsgemeinkosten
 - Trennung von Belangen
 - Grundsätzliche Verfahren
- 3 Zeitparameter
 - Zeitpunkte und Zeitintervalle
- 4 Planbarkeit
 - Zulässigkeit und Gültigkeit
 -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

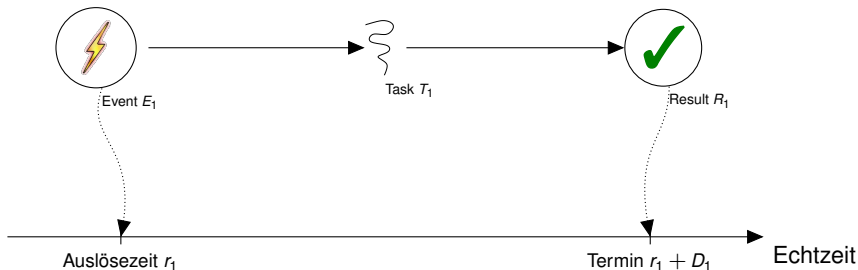




Echtzeit



- Das Ereignis E_i löst zum **Auslösezeitpunkt r_i** den Arbeitsauftrag $J_{i,j}$ der Aufgabe T_i aus



- 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.



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

- Damit ist die **Einlastung** des betreffenden Auftrags möglich
 - Voraussetzung: Abhängigkeitsbedingungen³ sind erfüllt
- Ggf. verzögert Einplanung/Koordinierung die Einlastung des Jobs



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



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

- Damit ist die **Einlastung** des betreffenden Auftrags möglich
 - Voraussetzung: Abhängigkeitsbedingungen³ 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



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



Einfache Aufgabe (engl. *simple task*)

→ Ohne Synchronisationspunkt

- Ausführung ist blockadefrei
- Unabhängig vom Fortschritt anderer 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





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





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



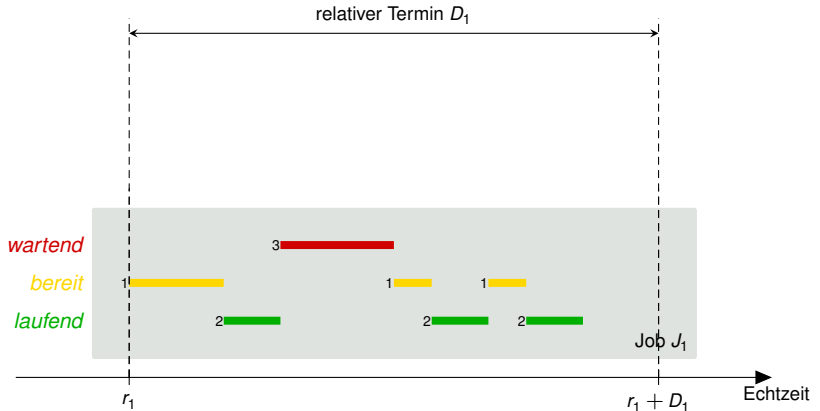
Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

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



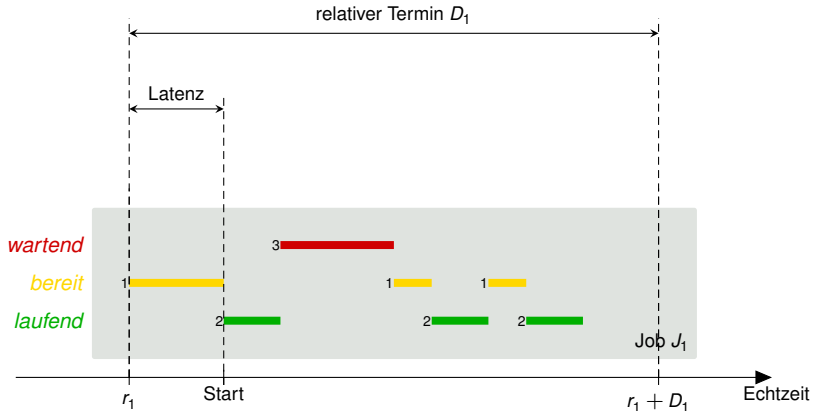
Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

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



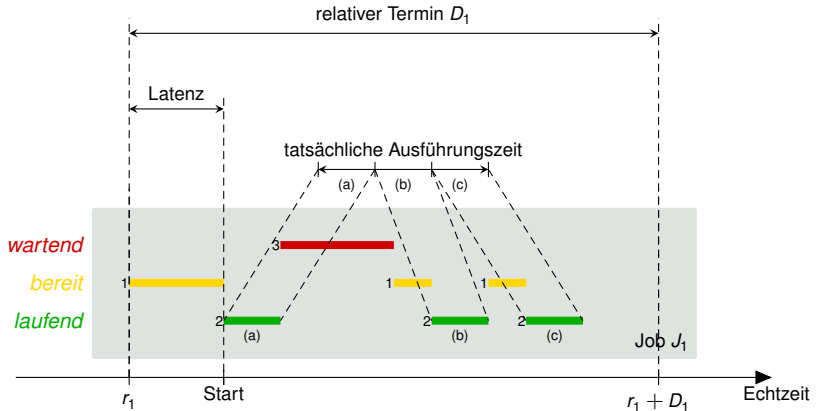
Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

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



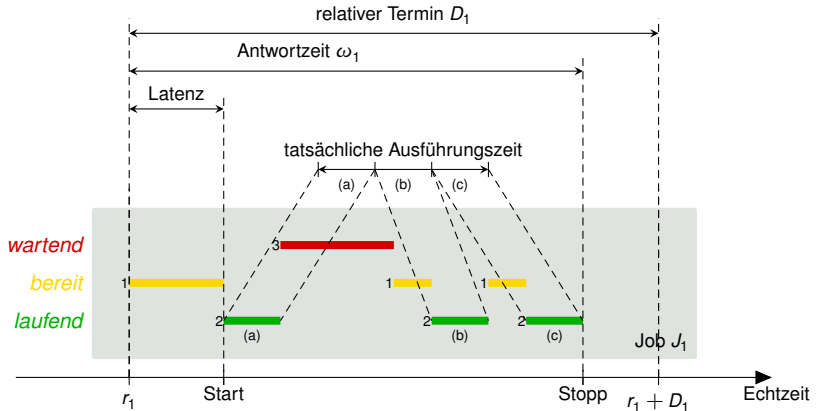
Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

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



Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

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





Latenz (engl. *latency*) $\mapsto$ Zeitdauer zwischen Auslösezeit und Beginn der Abarbeitung





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



☞ **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 $\sigma_{J_i} t$ (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

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

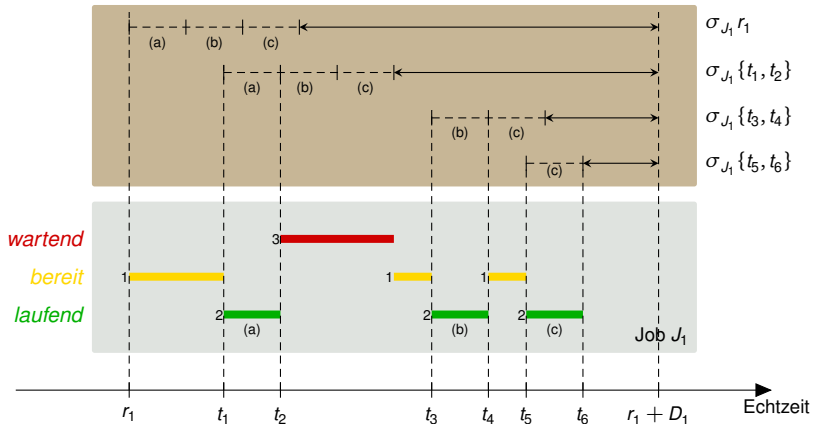
- Ziel: Rechtzeitige, nicht möglichst schnelle Fertigstellung von Aufträgen



Gibt der Einplanung Spielraum zur Einlastung eines Auftrags



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



- 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



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.



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*)?

- 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 **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

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



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



- 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



- 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



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



Zeitgesteuerte Systeme $\leadsto$ konstruktiv

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



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



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



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



- 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



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



- **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



- **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



- **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)

