

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



- 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?

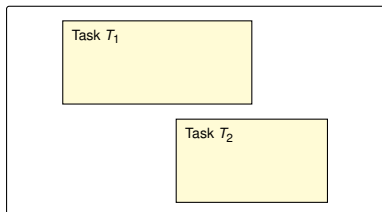


- 1 Einplanungseinheit
 - Elemente einer Echtzeitanwendung
 - Ausführungsstränge und Arbeitsaufträge
- 2 Ablaufsteuerung
 - Verwaltungsgemeinkosten
 - Trennung von Belangen
 - Grundsätzliche Verfahren
- 3 Zeitparameter
 - Zeitpunkte und Zeitintervalle
- 4 Planbarkeit
 - Zulässigkeit und Gültigkeit
 -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



Strukturelle Elemente einer Echtzeitanwendung

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



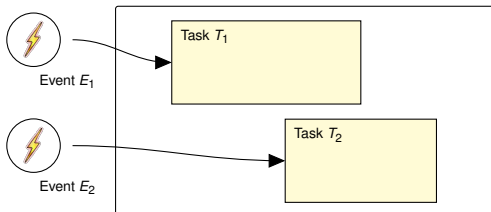
- Echtzeitanwendungen bestehen aus **Aufgaben T_i** (engl. *tasks*)





Strukturelle Elemente einer Echtzeitanwendung

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



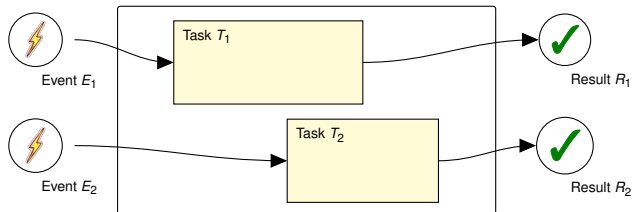
- Echtzeitanwendungen bestehen aus **Aufgaben T_i** (engl. *tasks*)
- Aufgaben werden durch **Ereignisse E_i** (engl. *events*) aktiviert





Strukturelle Elemente einer Echtzeitanwendung

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



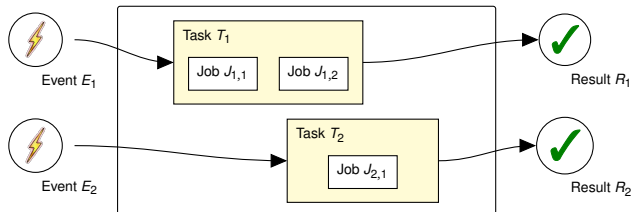
- Echtzeitanwendungen bestehen aus **Aufgaben T_i** (engl. *tasks*)
- Aufgaben werden durch **Ereignisse E_i** (engl. *events*) aktiviert
- Aufgaben stellen **Ergebnisse R_i** (engl. *results*) bereit





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, 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.





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 Rechensystem 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]*





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



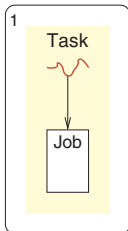
Die Aufgabe ist die **Entwurfseinheit**, der Arbeitsauftrag die **Einplanungseinheit**

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





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

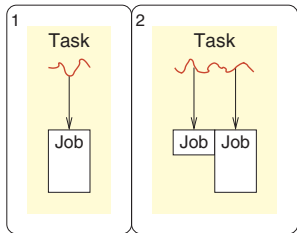


- Abbildung auf **Fäden** (engl. *threads*) des Betriebssystems
- 1** Einfädige Aufgabe, ein Arbeitsauftrag





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



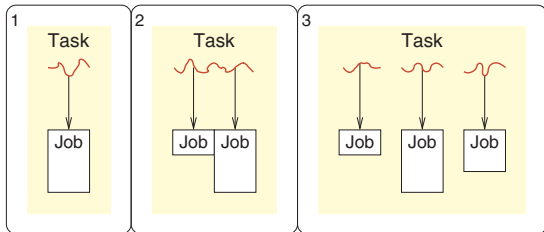
- Abbildung auf **Fäden** (engl. *threads*) des Betriebssystems

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





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



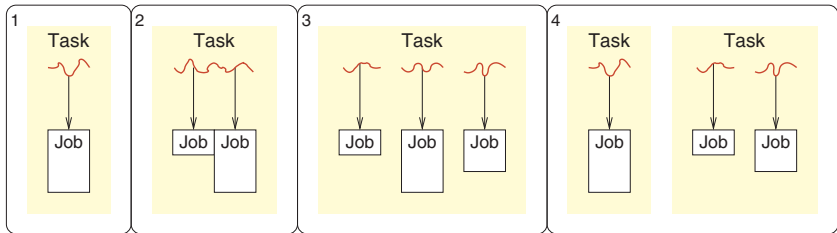
■ Abbildung auf **Fäden** (engl. *threads*) des Betriebssystems

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





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



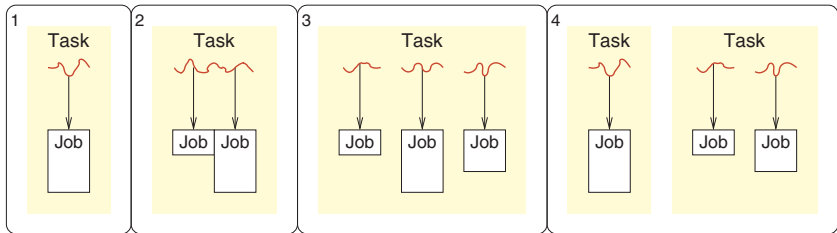
■ Abbildung auf **Fäden** (engl. *threads*) des Betriebssystems

- 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

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)

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

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



Verwaltungsgemeinkosten (engl. *overhead*)

Unterschiede² je nach Repräsentation von Aufgabe und Arbeitsauftrag

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

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



Verwaltungsgemeinkosten (engl. *overhead*)

Unterschiede² je nach Repräsentation von Aufgabe und Arbeitsauftrag

- 1 Einfädige Aufgabe \leadsto fliegengewichtig
 - $\mathcal{O}(\text{Prozeduraufruf})$
 - Auf- und Abbau vom Aktivierungsblock (engl. *activation record*)
- 2 Mehrfädige Aufgabe
 - 2.1 Gemeinsamer Adressraum \leadsto federgewichtig
 - $\mathcal{O}(\text{Fadenwechsel}) + \mathcal{O}(1.)$
 - Austausch der Inhalte von Arbeits-/Statusregister der CPU

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



Verwaltungsgemeinkosten (engl. *overhead*)

Unterschiede² je nach Repräsentation von Aufgabe und Arbeitsauftrag

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

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



Verwaltungsgemeinkosten (engl. *overhead*)

Unterschiede² je nach Repräsentation von Aufgabe und Arbeitsauftrag

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





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 (engl. *deadline monitoring*)
 - 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 (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



- **Einplanung** (engl. *scheduling*) \mapsto **Strategie**
 - \rightarrow 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 Laufzeit³

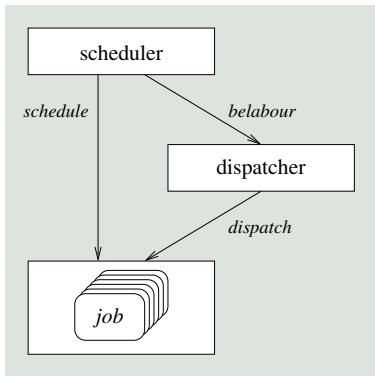
³Vorlage ist ggf. ein vor Beginn der Aufgabenbearbeitung offline erstellter Ablaufplan, der während der Aufgabenbearbeitung online fortgeschrieben wird.



- **Einplanung** (engl. *scheduling*) \mapsto **Strategie**
 - \rightarrow 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 Laufzeit³

- **Einlastung** (engl. *dispatching*) \mapsto **Mechanismus**
 - \rightarrow Umsetzung der Einplanungsentscheidungen
 - Abarbeitung des Ablaufplans von Arbeitsaufträgen
 - Ist immer gekoppelt mit der Aufgabenbearbeitung
 - Ablaufpläne können nur *online* befolgt werden

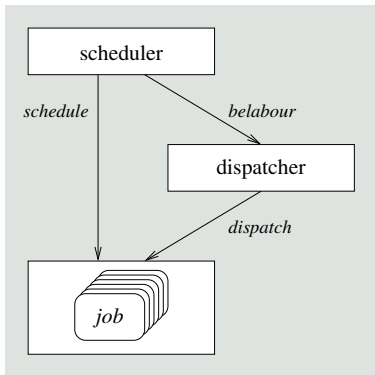
³Vorlage ist ggf. ein vor Beginn der Aufgabenbearbeitung offline erstellter Ablaufplan, der während der Aufgabenbearbeitung online fortgeschrieben wird.



Gekoppeltes System

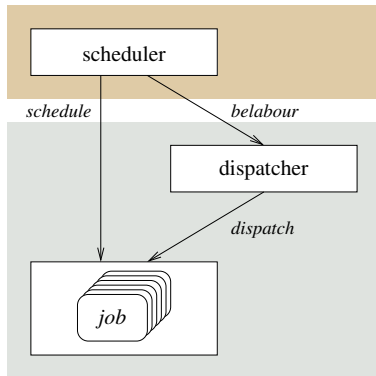
- Zeit- und örtlich gekoppelt
 - Zur Laufzeit
 - Integriert in einem System
 - Auf *einem* Rechner





Gekoppeltes System

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



Entkoppeltes System

- Zeit- oder örtlich entkoppelt
 - Vor und zur Laufzeit
 - Separiert in zwei Systeme
 - Ggf. auf zwei Rechnern



Einplanungszeitpunkte

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

- On-line scheduling (zur Laufzeit) \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 **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



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 *Echtzeitrechnungssystem*
- 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 *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





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 \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





Einplanung und Einlastungszeitpunkte **vorab nicht bekannt**

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





Einplanung und Einlastungszeitpunkte **vorab nicht bekannt**

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



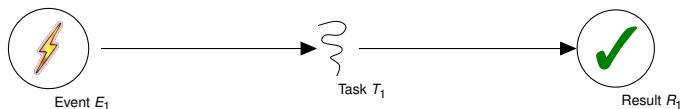
Ereignisse haben **Prioritäten** \mapsto **Dringlichkeiten**

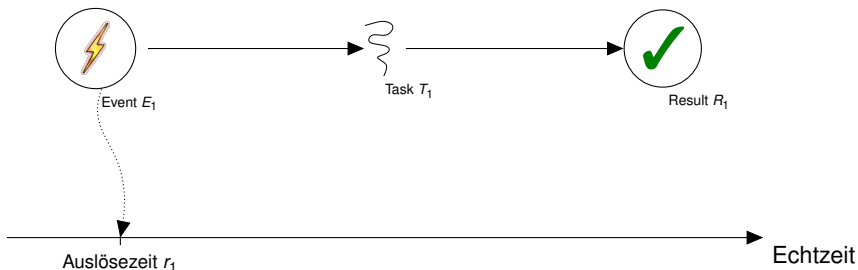
- Zuteilung von Betriebsmitteln erfolgt **prioritätsorientiert**
 - Arbeitsaufträge höherer Priorität haben Vorrang
- Prioritäten werden *offline* vergeben und ggf. *online* fortgeschrieben
 - Arbeitsaufträge haben eine statische oder dynamische Priorität
- Betriebsmittel (insb. CPU) bleiben niemals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



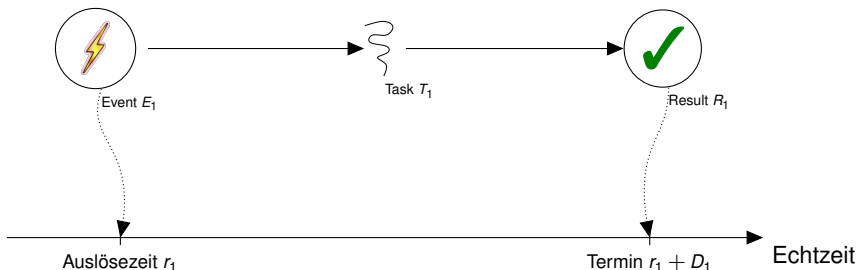
- 1 Einplanungseinheit
 - Elemente einer Echtzeitanwendung
 - Ausführungsstränge und Arbeitsaufträge
- 2 Ablaufsteuerung
 - Verwaltungsgemeinkosten
 - Trennung von Belangen
 - Grundsätzliche Verfahren
- 3 Zeitparameter
 - **Zeitpunkte und Zeitintervalle**
- 4 Planbarkeit
 - Zulässigkeit und Gültigkeit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







- 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: Abhängigkeitsbedingungen⁴ sind erfüllt
- Ggf. verzögert Einplanung/Koordinierung die Einlastung des Jobs



⁴Daten-/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: 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



⁴Daten-/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

- Keine 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

- Keine Beeinflussung von oder durch andere Aufgaben



Komplexe Aufgabe (engl. *complex task*)

→ Mit Synchronisationspunkt(en)

- Benötigt Betriebsmitteln (BM) (neben der CPU)
- 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

- Keine Beeinflussung von oder durch andere Aufgaben



Komplexe Aufgabe (engl. *complex task*)

→ Mit Synchronisationspunkt(en)

- Benötigt Betriebsmitteln (BM) (neben der CPU)
- Fortschritt hängt von anderer Aufgaben ab



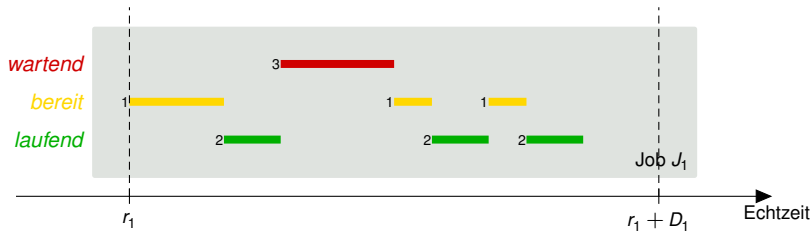
Muss global betrachtet werden \rightsquigarrow *Gesamtsystemanalyse*

- Analyse nur im Verbund mit allen Aufgaben des Systems



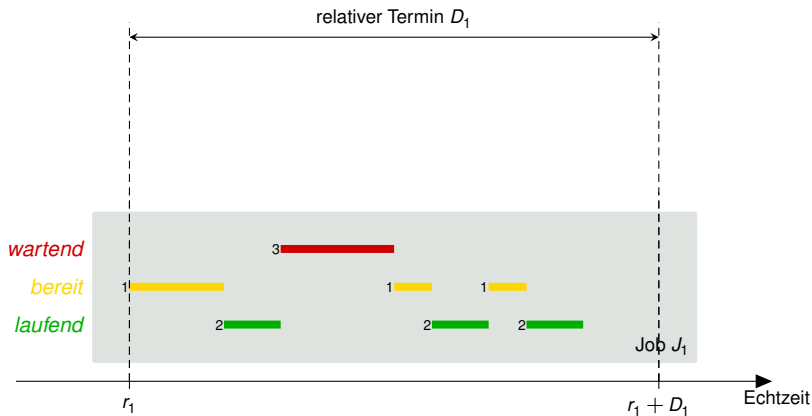
Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

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



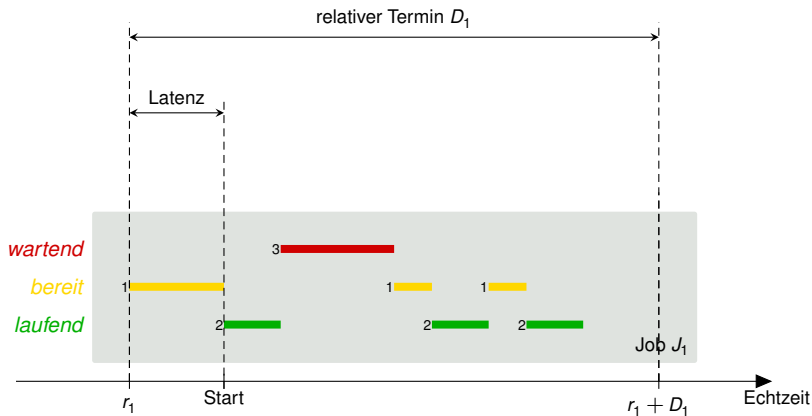
Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

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



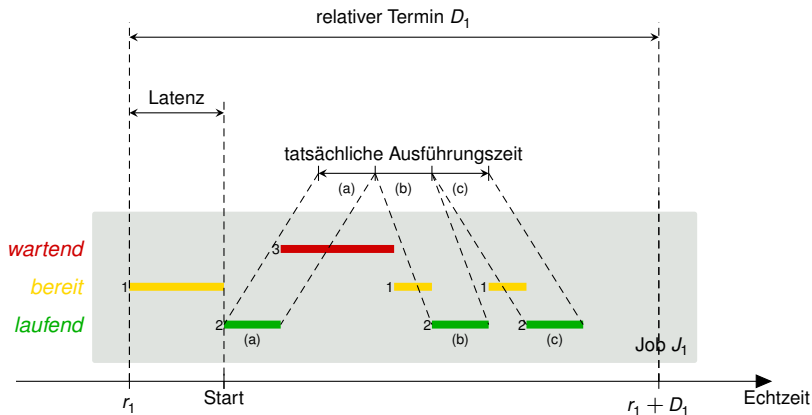
Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

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



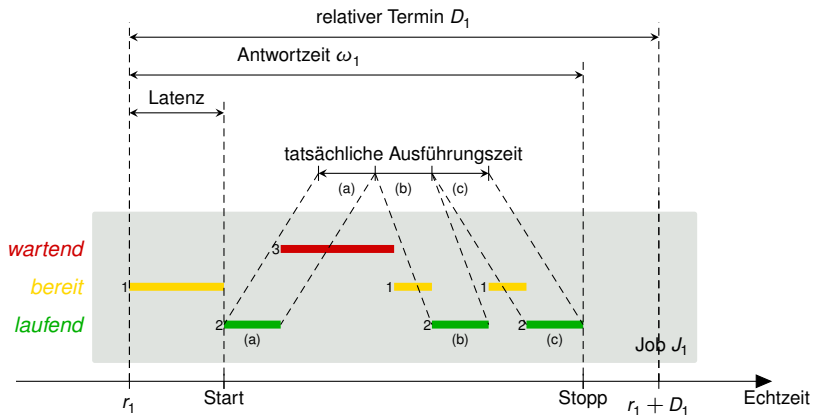
Arbeitsauftrag einer komplexen Aufgabe

- (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

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

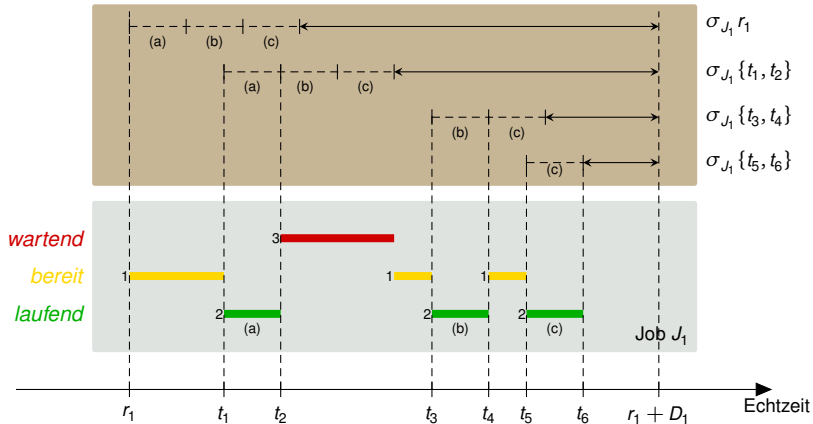
- Ziel: Rechtzeitige, nicht möglichst schnelle Fertigstellung von Aufträgen



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:
 - 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 **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

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



- 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 \rightsquigarrow analytisch

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



Zeitgesteuerte Systeme \rightsquigarrow analytisch

- 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



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

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



- 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)

