Echtzeitsysteme - Übungen

Simple Scope

Sommersemester 2024

Eva Dengler Peter Wägemann

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)
Lehrstuhl Informatik 4 (Systemsoftware)
https://sys.cs.fau.de

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

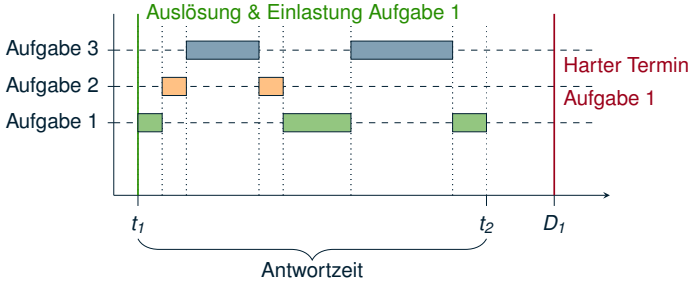
Übersicht

- Wiederholung
  - Antwortzeitanalyse
  - Ereignisorientierter Planer
  - Berechnungskomplexität
  - Ereignisgesteuerte & zeitgesteuerte Echtzeitsysteme
- eCos-Vertiefung
  - Alarme
  - Time-Triggered eCos
- Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First
- Hinweise zu Aufgabe 4
  - Software-Tracing

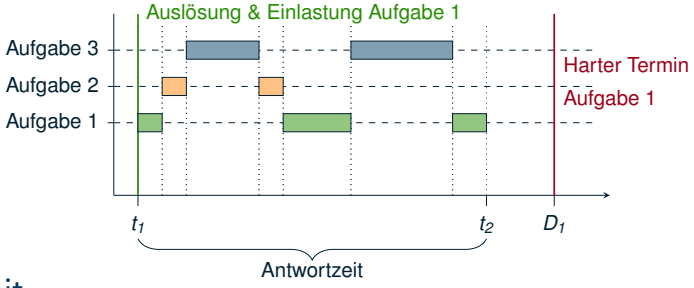
Übersicht

- Wiederholung
  - Antwortzeitanalyse
  - Ereignisorientierter Planer
  - Berechnungskomplexität
  - Ereignisgesteuerte & zeitgesteuerte Echtzeitsysteme
- eCos-Vertiefung
  - Alarme
  - Time-Triggered eCos
- Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First
- Hinweise zu Aufgabe 4
  - Software-Tracing

Antwortzeitanalyse



Antwortzeitanalyse



- Antwortzeit ω_i
  - Zeitdauer zwischen Auslösezeit und Terminationszeitpunkt
- Idee: Antwortzeitanalyse
  - Terminationszeitpunkt vor dem absoluten Termin d_i
  - Antwortzeit ω_i kürzer als der relative Termin D_i

  → Für jeden Auftrag $J_{i,j}$ in der Aufgabe: $T_i : \omega_{i,j} \leq D_{i,j}$
- Voraussetzungen
  - Bedingungen A1 - A7 müssen eingehalten werden
  - Konzept ist jedoch erweiterbar

Berechnung der Antwortzeit

- Antwortzeit ω_i der Aufgabe T_i berechnet sich zu:

$$\omega_i(t) = e_i$$

  - Aufgabe terminiert bevor das Ereignis (Periode) erneut eintritt
  - Setzt sich zusammen aus:
    - WCET e_i von T_i

Berechnung der Antwortzeit

- Antwortzeit ω_i der Aufgabe T_i berechnet sich zu:

$$\omega_i(t) = e_i + \sum_{k=1}^{i-1} \left\lceil \frac{t}{p_k} \right\rceil e_k; 0 < t \leq p_i$$

  - Aufgabe terminiert bevor das Ereignis (Periode) erneut eintritt
  - Setzt sich zusammen aus:
    - WCET e_i von T_i
    - WCETs $e_1, \ldots, e_{i-1}$ der Aufgaben $T_1, \ldots, T_{i-1}$ höherer Priorität

Berechnung der Antwortzeit

- Antwortzeit ω_i der Aufgabe T_i berechnet sich zu:

$$\omega_i(t) = e_i + \sum_{k=1}^{i-1} \left\lceil \frac{t}{p_k} \right\rceil e_k; 0 < t \leq p_i$$

  - Aufgabe terminiert bevor das Ereignis (Periode) erneut eintritt
  - Setzt sich zusammen aus:
    - WCET e_i von T_i
    - WCETs $e_1, \ldots, e_{i-1}$ der Aufgaben $T_1, \ldots, T_{i-1}$ höherer Priorität

- Prüfung: $\omega_i(t) \leq t$
  - $t = jp_k; \quad k = 1, 2, \ldots, i; \quad j = 1, 2, \ldots, \lfloor \min(p_i, D_i)/p_k \rfloor$
  - Zeitbedarf erhöht sich nur bei Auslösung dringlicherer Aufgaben
  - Bis das Ereignis erneut eintritt/der Termin der Aufgabe erreicht ist

Berechnung der Antwortzeit

- Antwortzeit ω_i der Aufgabe T_i berechnet sich zu:

$$\omega_i(t) = e_i + \sum_{k=1}^{i-1} \left\lceil \frac{t}{p_k} \right\rceil e_k; 0 < t \leq p_i$$

  - Aufgabe terminiert bevor das Ereignis (Periode) erneut eintritt
  - Setzt sich zusammen aus:
    - WCET e_i von T_i
    - WCETs $e_1, \ldots, e_{i-1}$ der Aufgaben $T_1, \ldots, T_{i-1}$ höherer Priorität

- Prüfung: $\omega_i(t) \leq t$
  - $t = jp_k; \quad k = 1, 2, \ldots, i; \quad j = 1, 2, \ldots, \lfloor \min(p_i, D_i)/p_k \rfloor$
  - Zeitbedarf erhöht sich nur bei Auslösung dringlicherer Aufgaben
  - Bis das Ereignis erneut eintritt/der Termin der Aufgabe erreicht ist

⚠ Ist die Ungleichung für **einen** Zeitpunkt t erfüllt, ist T_i zulässig

Beispielsystem

Aufgabe T_i	Periode p_i / ms	WCET e_i / ms	Termin D_i / ms
T_1	3	1	3
T_2	5	1.5	5
T_3	7	1.25	7
T_4	9	0.5	9

Alle Aufgaben weisen einen Phasenversatz ϕ_i von 0 auf

Beispiel: Berechnung der maximalen Antwortzeit

Aufgaben: $T_1 = (3, 1, 3, \phi_1)$, $T_2 = (5, 1.5, 5, \phi_2)$, $T_3 = (7, 1.25, 7, \phi_3)$, $T_4 = (9, 0.5, 9, \phi_4)$

- Antwortzeit ω_1 von T_1
  - $\omega_1(3) = 1 \leq 3 \rightsquigarrow$ zulässig

Beispiel: Berechnung der maximalen Antwortzeit

Aufgaben: $T_1 = (3, 1, 3, \phi_1)$, $T_2 = (5, 1.5, 5, \phi_2)$, $T_3 = (7, 1.25, 7, \phi_3)$, $T_4 = (9, 0.5, 9, \phi_4)$

- Antwortzeit ω_1 von T_1
  - $\omega_1(3) = 1 \leq 3 \rightsquigarrow$ zulässig
- Antwortzeit ω_2 von T_2
  - $\omega_2(3) = 1.5 + \left\lceil \frac{3}{3} \right\rceil 1 = 2.5 \leq 3 \rightsquigarrow$ zulässig

Beispiel: Berechnung der maximalen Antwortzeit

Aufgaben: $T_1 = (3, 1, 3, \phi_1)$, $T_2 = (5, 1.5, 5, \phi_2)$, $T_3 = (7, 1.25, 7, \phi_3)$, $T_4 = (9, 0.5, 9, \phi_4)$

- Antwortzeit ω_1 von T_1
  - $\omega_1(3) = 1 \leq 3 \rightsquigarrow$ zulässig
- Antwortzeit ω_2 von T_2
  - $\omega_2(3) = 1.5 + \lceil \frac{3}{3} \rceil 1 = 2.5 \leq 3 \rightsquigarrow$ zulässig
- Antwortzeit ω_3 von T_3
  - $\omega_3(3) = 1.25 + \lceil \frac{3}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{3}{5} \rceil 1.5 = 3.75 > 3$
  - $\omega_3(5) = 1.25 + \lceil \frac{5}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{5}{5} \rceil 1.5 = 4.75 \leq 5 \rightsquigarrow$ zulässig

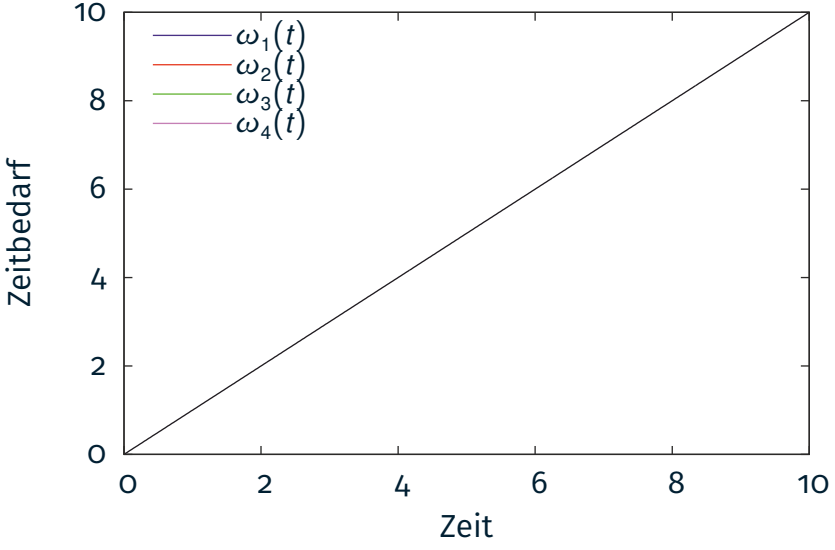
Beispiel: Berechnung der maximalen Antwortzeit

Aufgaben: $T_1 = (3, 1, 3, \phi_1)$, $T_2 = (5, 1.5, 5, \phi_2)$, $T_3 = (7, 1.25, 7, \phi_3)$, $T_4 = (9, 0.5, 9, \phi_4)$

- Antwortzeit ω_1 von T_1
  - $\omega_1(3) = 1 \leq 3 \rightsquigarrow$ zulässig
- Antwortzeit ω_2 von T_2
  - $\omega_2(3) = 1.5 + \lceil \frac{3}{3} \rceil 1 = 2.5 \leq 3 \rightsquigarrow$ zulässig
- Antwortzeit ω_3 von T_3
  - $\omega_3(3) = 1.25 + \lceil \frac{3}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{3}{5} \rceil 1.5 = 3.75 > 3$
  - $\omega_3(5) = 1.25 + \lceil \frac{5}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{5}{5} \rceil 1.5 = 4.75 \leq 5 \rightsquigarrow$ zulässig
- Antwortzeit ω_4 von T_4
  - $\omega_4(3) = 0.5 + \lceil \frac{3}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{3}{5} \rceil 1.5 + \lceil \frac{3}{7} \rceil 1.25 = 4.25 > 3$
  - $\omega_4(5) = 0.5 + \lceil \frac{5}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{5}{5} \rceil 1.5 + \lceil \frac{5}{7} \rceil 1.25 = 5.25 > 5$
  - $\omega_4(6) = 0.5 + \lceil \frac{6}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{6}{5} \rceil 1.5 + \lceil \frac{6}{7} \rceil 1.25 = 6.75 > 6$
  - $\omega_4(7) = 0.5 + \lceil \frac{7}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{7}{5} \rceil 1.5 + \lceil \frac{7}{7} \rceil 1.25 = 7.75 > 7$
  - $\omega_4(9) = 0.5 + \lceil \frac{9}{3} \rceil 1 + \lceil \frac{9}{5} \rceil 1.5 + \lceil \frac{9}{7} \rceil 1.25 = 9.00 \leq 9 \rightsquigarrow$ zulässig

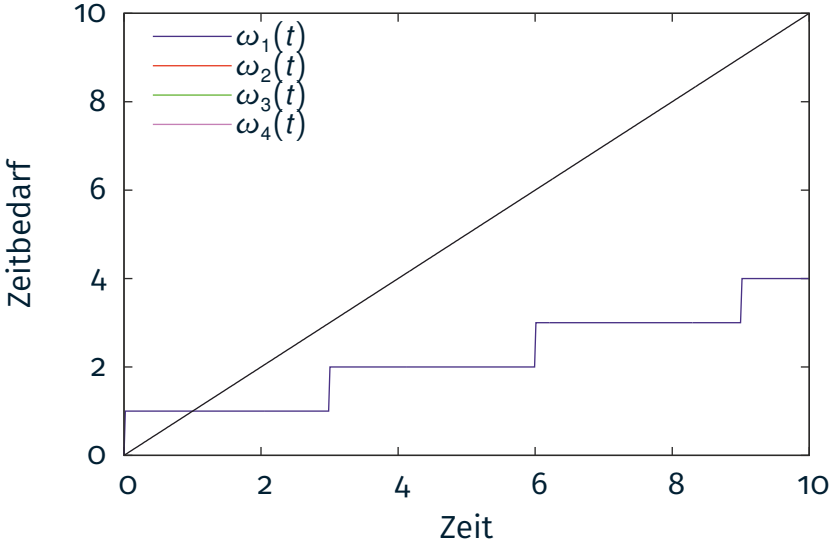
Beispiel: Berechnung der Zeitbedarfsfunktionen

Aufgaben: $T_1 = (3, 1, 3, \phi_1)$, $T_2 = (5, 1.5, 5, \phi_2)$, $T_3 = (7, 1.25, 7, \phi_3)$, $T_4 = (9, 0.5, 9, \phi_4)$



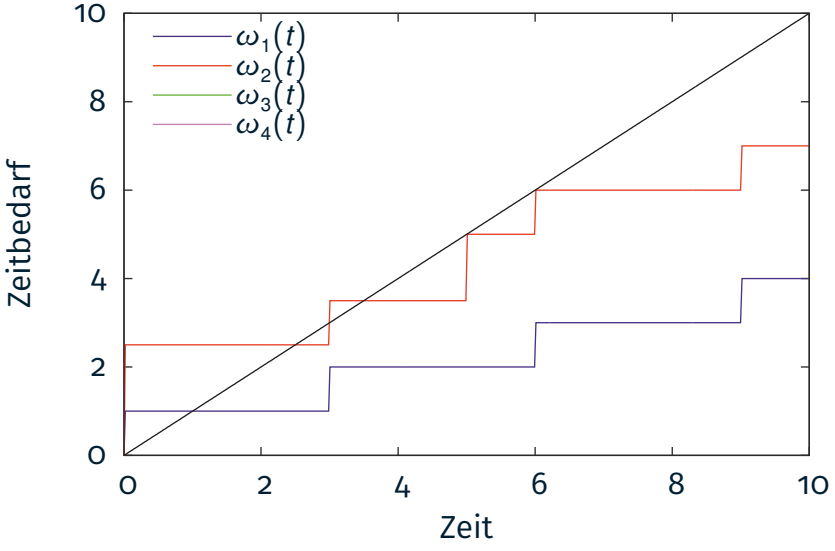
Beispiel: Berechnung der Zeitbedarfsfunktionen

Aufgaben: $T_1 = (3, 1, 3, \phi_1)$, $T_2 = (5, 1.5, 5, \phi_2)$, $T_3 = (7, 1.25, 7, \phi_3)$, $T_4 = (9, 0.5, 9, \phi_4)$



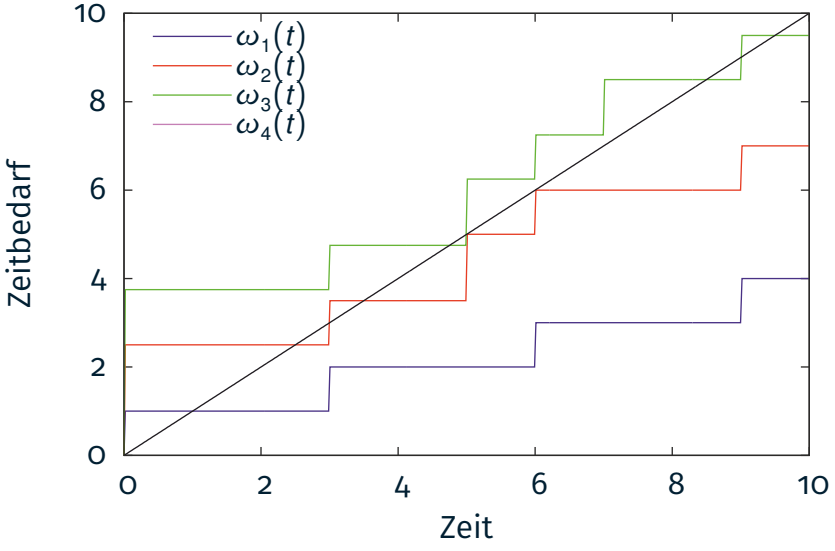
Beispiel: Berechnung der Zeitbedarfsfunktionen

Aufgaben: $T_1 = (3, 1, 3, \phi_1)$, $T_2 = (5, 1.5, 5, \phi_2)$, $T_3 = (7, 1.25, 7, \phi_3)$, $T_4 = (9, 0.5, 9, \phi_4)$



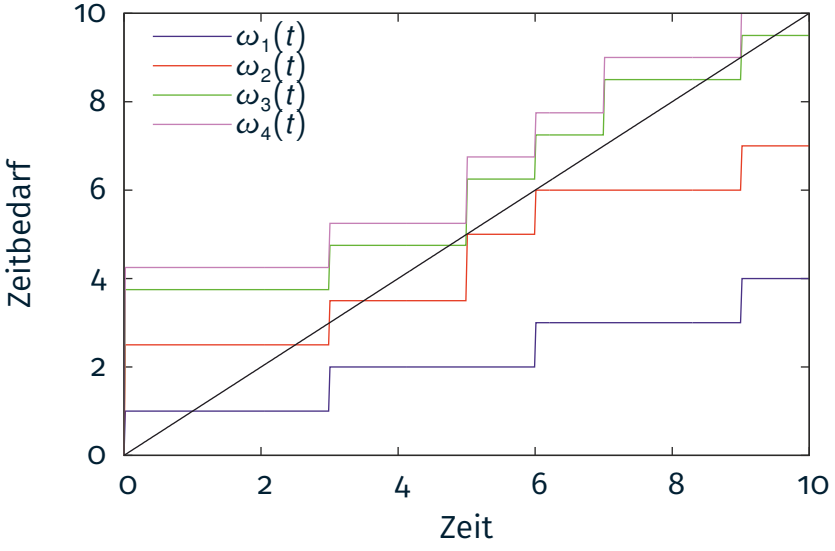
Beispiel: Berechnung der Zeitbedarfsfunktionen

Aufgaben: $T_1 = (3, 1, 3, \phi_1)$, $T_2 = (5, 1.5, 5, \phi_2)$, $T_3 = (7, 1.25, 7, \phi_3)$, $T_4 = (9, 0.5, 9, \phi_4)$



Beispiel: Berechnung der Zeitbedarfsfunktionen

Aufgaben: $T_1 = (3, 1, 3, \phi_1)$, $T_2 = (5, 1.5, 5, \phi_2)$, $T_3 = (7, 1.25, 7, \phi_3)$, $T_4 = (9, 0.5, 9, \phi_4)$



Restriktionen des periodischen Modells

⚠ Mathematische Ansätze zur zeitlichen Analyse periodischer Echtzeitsysteme bedingen häufig starke Einschränkungen:

A1 Alle Aufgaben sind periodisch

A2 Alle Arbeitsaufträge können an ihren Auslösezeitpunkten eingeplant und ausgeführt werden

A3 Termine und Perioden sind identisch

A4 Kein Arbeitsauftrag gibt die Kontrolle über den Prozessor ab

A5 Alle Aufgaben sind unabhängig[1]

A6 Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar

A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

[1] D.h. die einzige gemeinsame Ressource ist die CPU und es existieren keine Einschränkungen hinsichtlich der Auslösezeiten der Arbeitsaufträge voneinander.

Restriktionen des periodischen Modells

⚠ Mathematische Ansätze zur zeitlichen Analyse periodischer Echtzeitsysteme bedingen häufig starke Einschränkungen:

A1 Alle Aufgaben sind periodisch

A2 Alle Arbeitsaufträge können an ihren Auslösezeitpunkten eingeplant und ausgeführt werden

A3 Termine und Perioden sind identisch

A4 Kein Arbeitsauftrag gibt die Kontrolle über den Prozessor ab

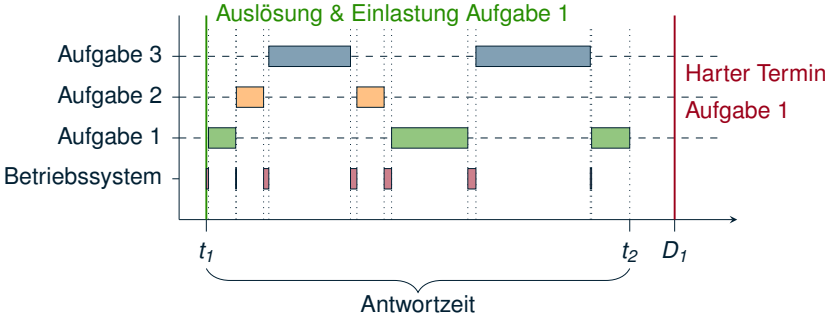
A5 Alle Aufgaben sind unabhängig[1]

A6 Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar

A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

[1] D.h. die einzige gemeinsame Ressource ist die CPU und es existieren keine Einschränkungen hinsichtlich der Auslösezeiten der Arbeitsaufträge voneinander.

Antwortzeitanalyse



Praktische Betrachtung

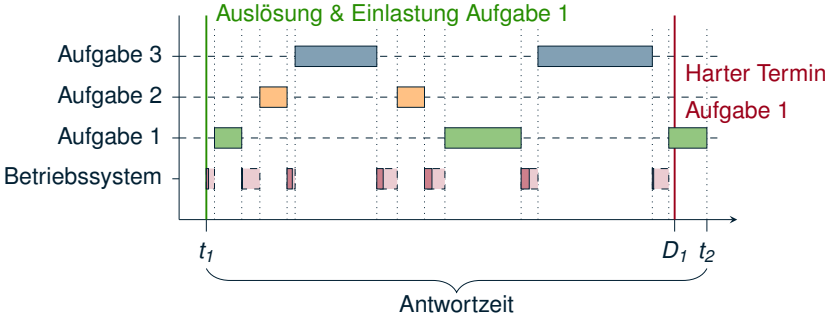
Beruht auf Voraussetzungen A1 – A7:

A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

$\rightsquigarrow$ Höherpriorere Aufgaben können jederzeit verdrängen

A6 Kosten von Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung vernachlässigbar

Antwortzeitanalyse



Praktische Betrachtung

Beruht auf Voraussetzungen A1 – A7:

A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

$\rightsquigarrow$ Höherpriorere Aufgaben können jederzeit verdrängen

A6 Kosten von Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung vernachlässigbar

Ereignisorientierte Einplanung (engl. *event-driven scheduling*)

⚠ Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu Ereigniszeitpunkten

- Ihr Auftreten ist nicht (exakt) vorhersehbar
- Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge

→ Die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen Dringlichkeit

Ereignisorientierte Einplanung (engl. *event-driven scheduling*)

⚠ Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu Ereigniszeitpunkten
- Ihr Auftreten ist nicht (exakt) vorhersehbar
- Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge

→ Die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen Dringlichkeit

☞ Ereignisse haben Prioritäten die dem Ereignisauslöser und/oder der Ereignisverarbeitung zugeordnet sind

Feste Zuordnung ↦ Ereignisverarbeitung/-auslöser
- Arbeitsaufträge erhalten absolute Priorität

Variable Zuordnung ↦ Ereignisverarbeitung
- Arbeitsaufträge erhalten relative Priorität

Ereignisorientierte Einplanung (engl. *event-driven scheduling*)

⚠ Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu Ereigniszeitpunkten
- Ihr Auftreten ist nicht (exakt) vorhersehbar
- Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge

→ Die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen Dringlichkeit

☞ Ereignisse haben Prioritäten die dem Ereignisauslöser und/oder der Ereignisverarbeitung zugeordnet sind

Feste Zuordnung ↦ Ereignisverarbeitung/-auslöser
- Arbeitsaufträge erhalten absolute Priorität

Variable Zuordnung ↦ Ereignisverarbeitung
- Arbeitsaufträge erhalten relative Priorität

Auch prioritätsorientierte Einplanung (engl. *priority-driven scheduling*)

Ereignisorientierter Planer (engl. *event-driven scheduler*)

- Einplanung ereignisbedingt ausgelöster Arbeitsaufträge resultiert in einer dynamischen Datenstruktur $\mapsto$ sortierte Liste

Ereignisorientierter Planer (engl. *event-driven scheduler*)

- Einplanung ereignisbedingt ausgelöster Arbeitsaufträge resultiert in einer dynamischen Datenstruktur ↦ sortierte Liste

⚠ Kritisch ist die Berechnungskomplexität und wann sie anfällt
  - Gekoppelt mit der Einlastung: *online scheduling* (siehe VL)
  - Konstant oder variabel, dann jedoch mit oberer Schranke ↦ WCET

  → Zum Auslöse- oder Auswahlzeitpunkt von Arbeitsaufträgen

Ereignisorientierter Planer (engl. *event-driven scheduler*)

- Einplanung ereignisbedingt ausgelöster Arbeitsaufträge resultiert in einer dynamischen Datenstruktur ↦ sortierte Liste

⚠ Kritisch ist die Berechnungskomplexität und wann sie anfällt
  - Gekoppelt mit der Einlastung: *online scheduling* (siehe VL)
  - Konstant oder variabel, dann jedoch mit oberer Schranke ↦ WCET

  → Zum Auslöse- oder Auswahlzeitpunkt von Arbeitsaufträgen

☞ Priorität bildet den Sortierschlüssel (engl. *sort key*)
  - Ergibt sich ggf. erst zum Ereigniszeitpunkt aus der Priorität der von ihm zu verarbeitenden Ereignissen
  - Ist eindeutig abzubilden auf einen endlichen Wertebereich

Aufbau und Berechnungskomplexität

Feste/Dynamische Prioritäten und Ablauftabellen/-listen:

- Ablaufliste ↦ Dynamische Datenstruktur
  - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
  - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an

  → Eignung für die Implementierung dynamischer Prioritäten

Aufbau und Berechnungskomplexität

Feste/Dynamische Prioritäten und Ablauftabellen/-listen:

- Ablaufliste ↦ Dynamische Datenstruktur
  - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
  - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an

  → Eignung für die Implementierung dynamischer Prioritäten

  - Linearer Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
    - Vorabwissen zur WCET des Sortiervorgangs ist gefordert

Aufbau und Berechnungskomplexität

Feste/Dynamische Prioritäten und Ablauftabellen/-listen:

- Ablaufliste ↦ Dynamische Datenstruktur
  - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
  - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an

  → Eignung für die Implementierung dynamischer Prioritäten

  - Linearer Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
    - Vorabwissen zur WCET des Sortiervorgangs ist gefordert
  - Nahezu konstanter Berechnungsaufwand zum Auswahlzeitpunkt
    - Aufträge vom Kopf her der (ggf. einfach verketteten) Liste entnehmen

Aufbau und Berechnungskomplexität

Feste/Dynamische Prioritäten und Ablauftabellen/-listen:

- Ablaufliste ↦ Dynamische Datenstruktur
  - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
  - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an

  → Eignung für die Implementierung dynamischer Prioritäten

  - Linearer Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
    - Vorabwissen zur WCET des Sortiervorgangs ist gefordert
  - Nahezu konstanter Berechnungsaufwand zum Auswahlzeitpunkt
    - Aufträge vom Kopf her der (ggf. einfach verketteten) Liste entnehmen
- Ablauftabelle ↦ Statische Datenstruktur
  - Prioritäten werden fest auf Tabellenindizes abgebildet
  - Zur Laufzeit unveränderliches Gefüge absoluter Prioritäten

  → Eignung für die Implementierung fester Prioritäten

Aufbau und Berechnungskomplexität

Feste/Dynamische Prioritäten und Ablauftabellen/-listen:

- Ablaufliste ↦ Dynamische Datenstruktur
  - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
  - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an

  → Eignung für die Implementierung dynamischer Prioritäten

  - Linearer Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
    - Vorabwissen zur WCET des Sortiervorgangs ist gefordert
  - Nahezu konstanter Berechnungsaufwand zum Auswahlzeitpunkt
    - Aufträge vom Kopf her der (ggf. einfach verketteten) Liste entnehmen
- Ablauftabelle ↦ Statische Datenstruktur
  - Prioritäten werden fest auf Tabellenindizes abgebildet
  - Zur Laufzeit unveränderliches Gefüge absoluter Prioritäten

  → Eignung für die Implementierung fester Prioritäten

  - Konstanter Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
    - Aufträge durch indizierte Adressierung in die Tabelle aufnehmen
    - Ggf. ist ein Tabelleneintrag eine Auftragliste (FIFO) gleicher Priorität

Aufbau und Berechnungskomplexität

Feste/Dynamische Prioritäten und Ablauftabellen/-listen:

- Ablaufliste ↦ Dynamische Datenstruktur
  - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
  - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an

  → Eignung für die Implementierung dynamischer Prioritäten

  - Linearer Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
    - Vorabwissen zur WCET des Sortiervorgangs ist gefordert
  - Nahezu konstanter Berechnungsaufwand zum Auswahlzeitpunkt
    - Aufträge vom Kopf her der (ggf. einfach verketteten) Liste entnehmen
- Ablauftabelle ↦ Statische Datenstruktur
  - Prioritäten werden fest auf Tabellenindizes abgebildet
  - Zur Laufzeit unveränderliches Gefüge absoluter Prioritäten

  → Eignung für die Implementierung fester Prioritäten

  - Konstanter Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
    - Aufträge durch indizierte Adressierung in die Tabelle aufnehmen
    - Ggf. ist ein Tabelleneintrag eine Auftragliste (FIFO) gleicher Priorität
  - Linearer Berechnungsaufwand zum Auswahlzeitpunkt
    - Vorabwissen zur WCET des Suchvorgangs ist gefordert
    - Tabelleneinträge können leer sein und sind zu überspringen

Ablaufliste

```
Job *list = 0;

void release(Job *item) {
  Job* last = 0, tail = list;

  while(tail && outrank(tail,item)) {
    last = tail;
    tail = last->next;
  }

  if(!last) {
    item->next = list; list = item;
  } else {
    item->next = tail;
    last->next = item;
  }
}

Job* extract() {
  Job* item = list;
  if(item) list = item->next;
  return item;
}
```

Ablaufliste

```
Job *list = 0;

void release(Job *item) {
  Job* last = 0, tail = list;

  while(tail && outrank(tail,item)) {
    last = tail;
    tail = last->next;
  }

  if(!last) {
    item->next = list; list = item;
  } else {
    item->next = tail;
    last->next = item;
  }
}

Job* extract() {
  Job* item = list;
  if(item) list = item->next;
  return item;
}
```

release $O(n)$

extract $O(1)$

Ablaufliste

```
Job *list = 0;

void release(Job *item) {
  Job* last = 0, tail = list;

  while(tail && outrank(tail,item)) {
    last = tail;
    tail = last->next;
  }

  if(!last) {
    item->next = list; list = item;
  } else {
    item->next = tail;
    last->next = item;
  }
}

Job* extract() {
  Job* item = list;
  if(item) list = item->next;
  return item;
}
```

release $O(n)$

extract $O(1)$

Ablauftabelle

```
Job* table[Jobs];

void release(Job *item) {
  assert((priority(item) >= 0)
      && (priority(item) <= Jobs - 1));
  item->state = Ready;
}

Job* extract() {
  for(uint slot = 0;slot < Jobs;slot++)
    if(table[slot]->state == Ready) {
      table[slot]->state = Selected;
      return table[slot];
    }

  return 0;
}
```

⚠ Feste Anzahl an Aufträgen

Berechnungskomplexität (Forts.)

Ablaufliste

```
Job *list = 0;

void release(Job *item) {
  Job* last = 0, tail = list;

  while(tail && outrank(tail,item)) {
    last = tail;
    tail = last->next;
  }

  if(!last) {
    item->next = list; list = item;
  } else {
    item->next = tail;
    last->next = item;
  }
}

Job* extract() {
  Job* item = list;
  if(item) list = item->next;
  return item;
}
```

release $O(n)$

extract $O(1)$

Ablauftabelle

```
Job* table[Jobs];

void release(Job *item) {
  assert((priority(item) >= 0)
      && (priority(item) <= Jobs - 1));
  item->state = Ready;
}

Job* extract() {
  for(uint slot = 0;slot < Jobs;slot++)
    if(table[slot]->state == Ready) {
      table[slot]->state = Selected;
      return table[slot];
    }

  return 0;
}
```

⚠ Feste Anzahl an Aufträgen

release $O(1)$

extract $O(n)$

Multi-Level-Queue-Scheduler, MLQ-Scheduler

Häufig anzutreffende Sonderform der Ablauftabelle:

- Eine Ablaufliste je Priorität, organisiert als FIFO
- Ablauflisten werden in einer Ablauftabelle verwaltet

Multi-Level-Queue

```
Job* table[Jobs];

void release(Job *item) {
  assert((prio(item) >= 0)
      && (prio(item) <= Jobs - 1));
  item->state = Ready;
  append(table[prio(item)],item);
}

Job* extract() {
  for(uint slot = 0;slot < prios; slot++)
    if(!empty(table[slot])) {
      Job *item = head(table[slot]);
      item->state = Selected;
      return item;
    }

  return 0;
}
```

Multi-Level-Queue-Scheduler, MLQ-Scheduler

Häufig anzutreffende Sonderform der Ablauftabelle:

- Eine Ablaufliste je Priorität, organisiert als FIFO
- Ablauflisten werden in einer Ablauftabelle verwaltet

Multi-Level-Queue

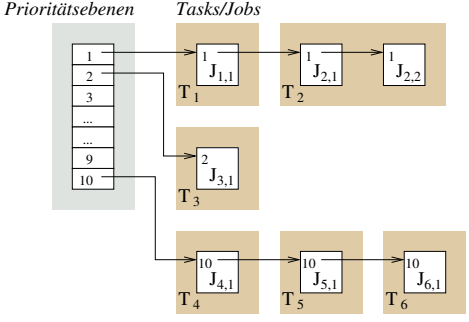
```
Job* table[Jobs];

void release(Job *item) {
  assert((prio(item) >= 0)
      && (prio(item) <= Jobs - 1));
  item->state = Ready;
  append(table[prio(item)],item);
}

Job* extract() {
  for(uint slot = 0;slot < prios; slot++)
    if(!empty(table[slot])) {
      Job *item = head(table[slot]);
      item->state = Selected;
      return item;
    }

  return 0;
}
```

- Mehrere Tasks pro Priorität
- Mehrere Aufträge pro Task
- Reihenfolge der Auslösung



Prioritätsorientierter $O(1)$-*Scheduler* !? Die Tücke liegt oft im Detail…

Auftragauslösung mit konstantem Aufwand $O(1)$ möglich?

Prioritätsorientierter $O(1)$-*Scheduler* !? Die Tücke liegt oft im Detail…

Auftragauslösung mit konstantem Aufwand $O(1)$ möglich?

1. Ablaufplan: dyn. Datenstruktur (Tabelle) aus mehreren Prioritätsebenen
   Wartelisten $\mapsto$ LIFO **Warteschlangen** $\rightsquigarrow$ FIFO

Prioritätsorientierter $O(1)$-*Scheduler* !? Die Tücke liegt oft im Detail…

Auftragauslösung mit konstantem Aufwand $O(1)$ möglich?

1. Ablaufplan: dyn. Datenstruktur (Tabelle) aus mehreren Prioritätsebenen
   Wartelisten $\mapsto$ LIFO **Warteschlangen** $\rightsquigarrow$ FIFO
2. Aufträge in selbem Tabelleneintrag besitzen dieselbe Priorität
   - Sonst könnte LIFO/FIFO Prioritätsverletzung zur Folge haben

Prioritätsorientierter $O(1)$-*Scheduler* !? Die Tücke liegt oft im Detail…

Auftragauslösung mit konstantem Aufwand $O(1)$ möglich?

1. Ablaufplan: dyn. Datenstruktur (Tabelle) aus mehreren Prioritätsebenen
   Wartelisten $\mapsto$ LIFO **Warteschlangen** $\rightsquigarrow$ FIFO
2. Aufträge in selbem Tabelleneintrag besitzen dieselbe Priorität
   - Sonst könnte LIFO/FIFO Prioritätsverletzung zur Folge haben
3. Anzahl der Tabelleneinträge entspricht mindestens der Anzahl statisch zugewiesener Prioritäten
   - Ggf. werden nahezu alle Tabelleneinträge nur einen Auftrag erfassen
   - Abhängig von der Echtzeitanwendung und dem Einplanungsverfahren

Prioritätsorientierter $O(1)$-*Scheduler* !? Die Tücke liegt oft im Detail…

Auftragauslösung mit konstantem Aufwand $O(1)$ möglich?

1. Ablaufplan: dyn. Datenstruktur (Tabelle) aus mehreren Prioritätsebenen
   Wartelisten $\mapsto$ LIFO **Warteschlangen** $\rightsquigarrow$ FIFO
2. Aufträge in selbem Tabelleneintrag besitzen dieselbe Priorität
   - Sonst könnte LIFO/FIFO Prioritätsverletzung zur Folge haben
3. Anzahl der Tabelleneinträge entspricht mindestens der Anzahl statisch zugewiesener Prioritäten
   - Ggf. werden nahezu alle Tabelleneinträge nur einen Auftrag erfassen
   - Abhängig von der Echtzeitanwendung und dem Einplanungsverfahren

Auftragauswahl ist unter diesen Bedingungen nicht in $O(1)$ möglich:

- Leere Tabelleneinträge sind ggf. zu überspringen

Prioritätsorientierter $O(1)$-*Scheduler* (Forts.) !? Eine Abwägungsfrage…

⚠ Vorrangsteuerung ist mit grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:

- Entweder Auftragauslösung oder Auftragauswahl mit $O(1)$ zu versehen
  - Beides zugleich geht nicht

Prioritätsorientierter $O(1)$-*Scheduler* (Forts.) ⁉ Eine Abwägungsfrage…

⚠ Vorrangsteuerung ist mit grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:

- Entweder Auftragauslösung oder Auftragauswahl mit $O(1)$ zu versehen
  - Beides zugleich geht nicht

☞ Für Auftragauslösung in $O(1)$ spricht:

- Ereignisgesteuerte Auslösung benötigen konstante Zeit
  - Z.B. als Folge eines *Interrupts* oder der Zustellung eines *Zeitsignals*
  - Bedeutsam für voll-verdrängbare Systeme

→ Ereignisbedingte Auftragverzögerungen lassen sich exakt bestimmen

Prioritätsorientierter $O(1)$-*Scheduler* (Forts.) !? Eine Abwägungsfrage…

⚠ Vorrangsteuerung ist mit grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:

- Entweder Auftragauslösung oder Auftragauswahl mit $O(1)$ zu versehen
  - Beides zugleich geht nicht

☞ Für Auftragauslösung in $O(1)$ spricht:

- Ereignisgesteuerte Auslösung benötigen konstante Zeit
  - Z.B. als Folge eines *Interrupts* oder der Zustellung eines *Zeitsignals*
  - Bedeutsam für voll-verdrängbare Systeme

→ Ereignisbedingte Auftragverzögerungen lassen sich exakt bestimmen

☞ Für Auftragauswahl in $O(1)$ spricht:

- Übergang zum nachfolgenden Auftrag benötigt konstante Zeit
  - Z.B. wenn der aktuelle Auftrag durchgelaufen ist oder blockiert

Prioritätsorientierter $O(1)$-*Scheduler* (Forts.) ⁉ Eine Abwägungsfrage…

⚠ Vorrangsteuerung ist mit grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:
- Entweder Auftragauslösung oder Auftragauswahl mit $O(1)$ zu versehen
  - Beides zugleich geht nicht

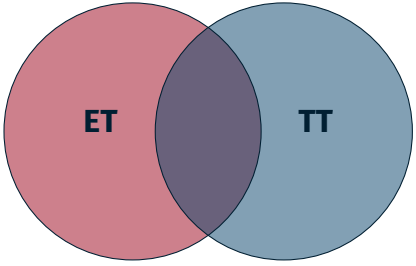
☞ Für Auftragauslösung in $O(1)$ spricht:
- Ereignisgesteuerte Auslösung benötigen konstante Zeit
  - Z.B. als Folge eines *Interrupts* oder der Zustellung eines *Zeitsignals*
  - Bedeutsam für voll-verdrängbare Systeme

→ Ereignisbedingte Auftragverzögerungen lassen sich exakt bestimmen

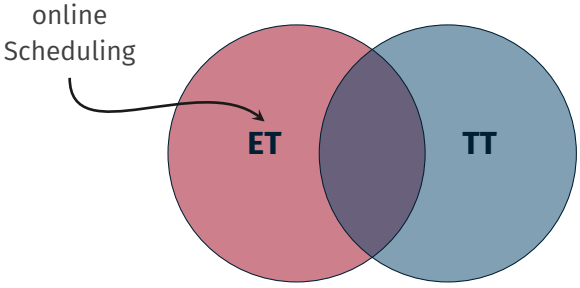
☞ Für Auftragauswahl in $O(1)$ spricht:
- Übergang zum nachfolgenden Auftrag benötigt konstante Zeit
  - Z.B. wenn der aktuelle Auftrag durchgelaufen ist oder blockiert

☞ Linux (bis 2.6), Mach, QNX, …, VxWorks verhelfen Auftragauslösung zu $O(1)$

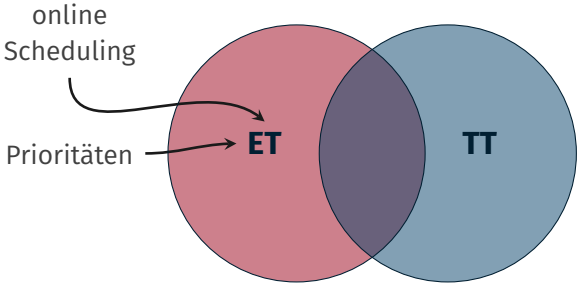
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



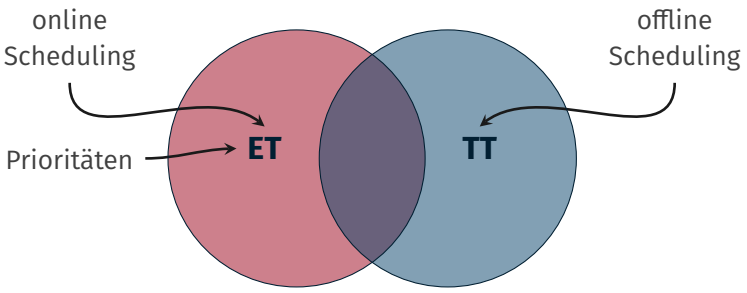
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



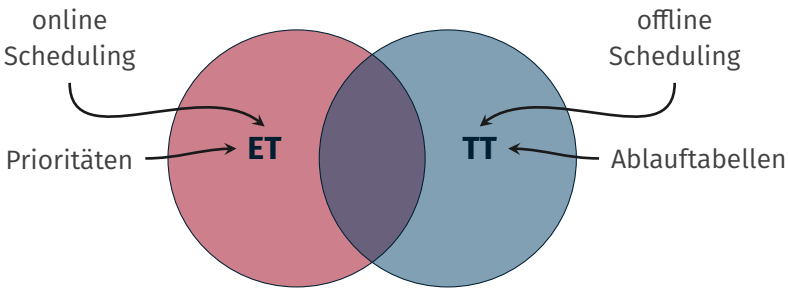
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



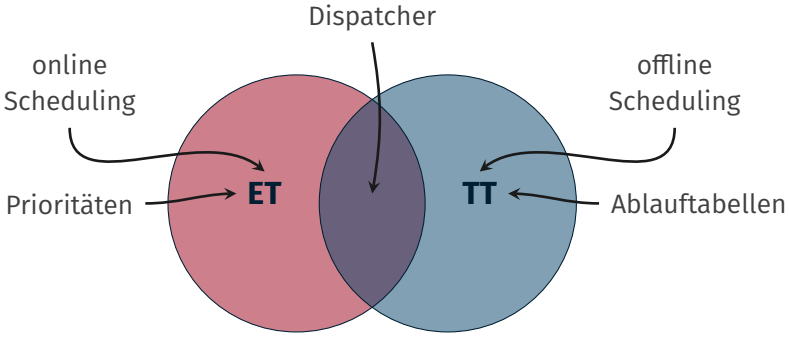
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



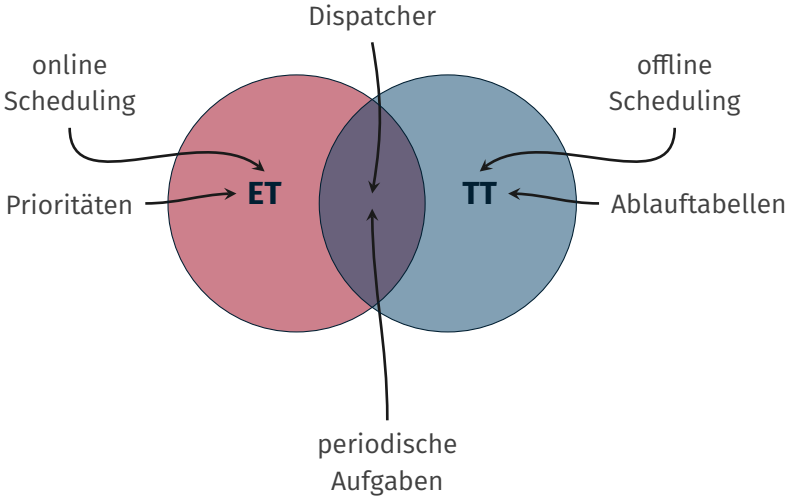
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



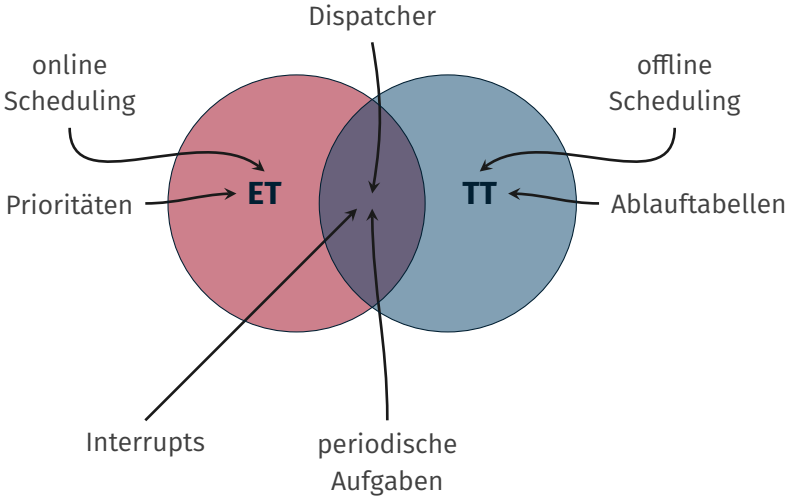
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



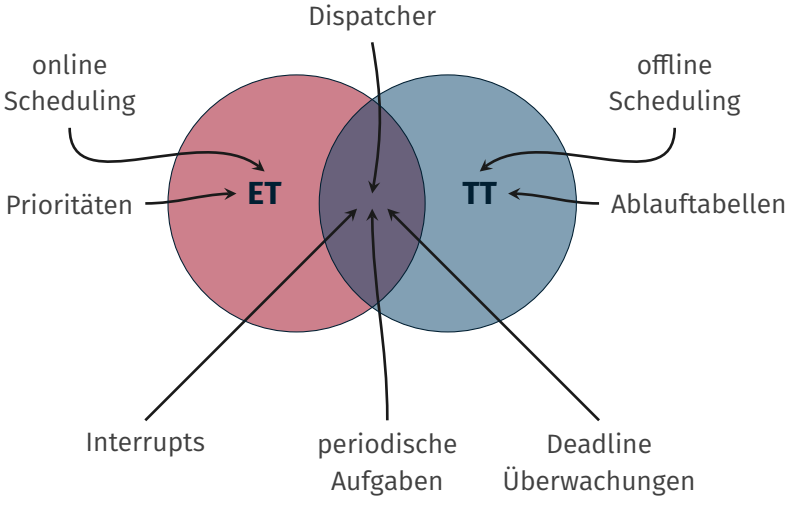
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



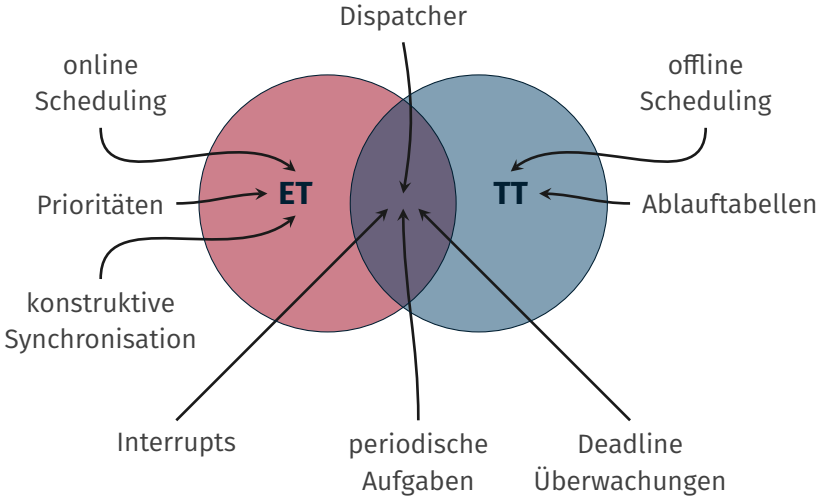
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



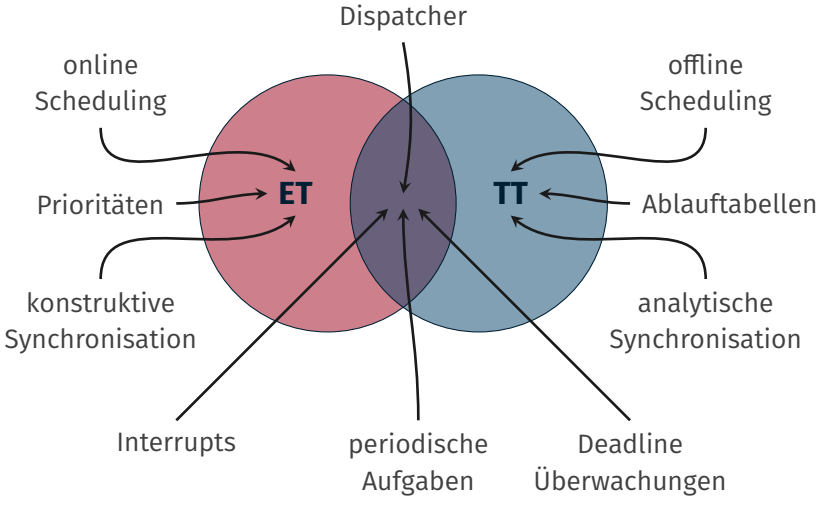
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



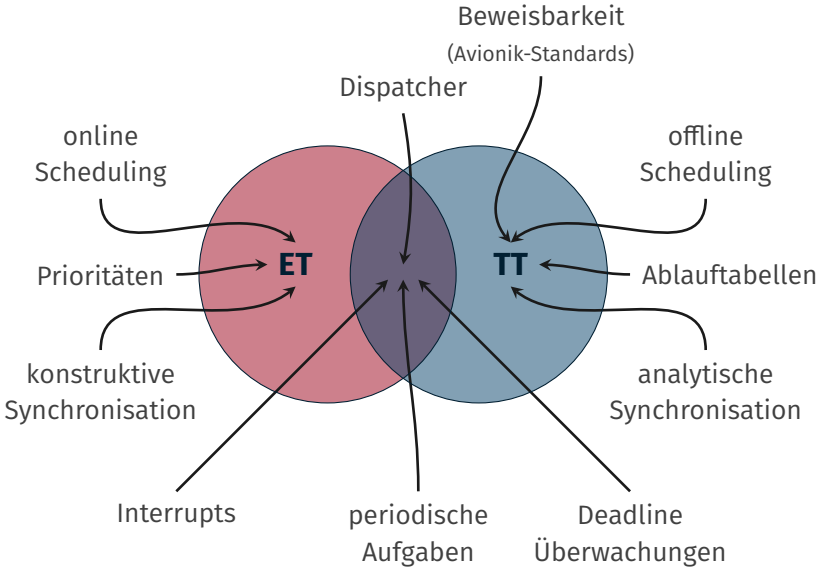
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



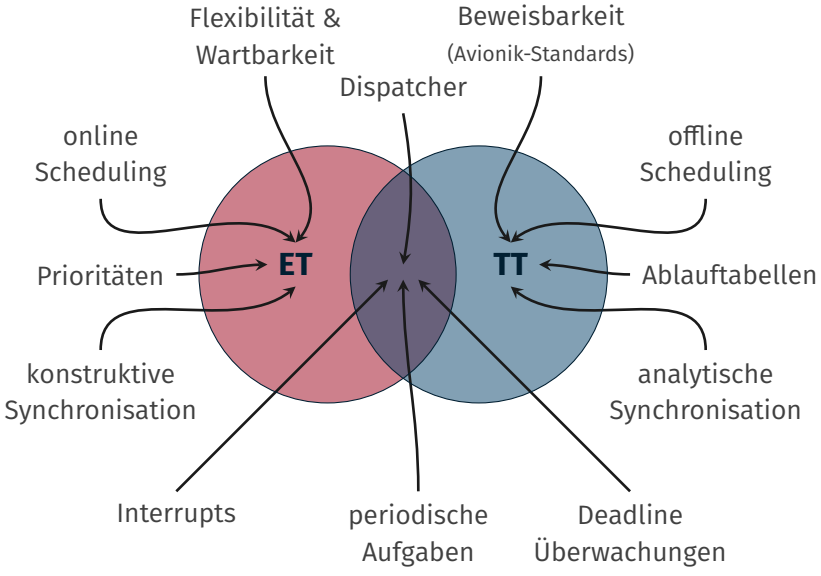
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



Übersicht

Wiederholung
- Antwortzeitanalyse
- Ereignisorientierter Planer
- Berechnungskomplexität
- Ereignisgesteuerte & zeitgesteuerte Echtzeitsysteme

eCos-Vertiefung
- Alarme
- Time-Triggered eCos

Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First

Hinweise zu Aufgabe 4
- Software-Tracing

Alarme und periodische Aktivierung

eCos-*Alarme* basieren auf eCos-*Zählern* (Counter) [2])

- Anlegen eines Zähler für bestimmtes Ereignis

```
1 void cyg_counter_create(cyg_handle_t* handle, cyg_counter* counter)
```

- Inkrementieren:

```
1 void cyg_counter_tick(cyg_handle_t counter)
```

  - Zeitgeberunterbrechung (→ DSR)
    → eCos-interne Uhr als Zähler
  - externes Ereignis (Taster, etc.)
    → Zähler wird „in Software“ inkrementiert (→ DSR, → Faden)

- eCos verwaltet Zählerstand intern
- Zugriff auf Zählerstand:

```
1 cyg_tick_count_t cyg_counter_current_value(cyg_handle_t ctr);
2 void cyg_counter_set_value(cyg_handle_t ctr, cyg_tick_count_t val);
```

[2] http://ecos.sourceware.org/docs-la/ref/kernel-counters.html

Alarme und periodische Aktivierung

- eCos-*Uhren* (Clocks[3]) sind spezialisierte *Zähler*
- Basierend auf *Zeitgeberunterbrechung*
- Festgelegte Zeitauflösung beim Erstellen

[3] http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-clocks.html

Alarme und periodische Aktivierung

- eCos-*Uhren* (Clocks[3]) sind spezialisierte *Zähler*
- Basierend auf *Zeitgeberunterbrechung*
- Festgelegte Zeitauflösung beim Erstellen
- Einzige vorgegebene Uhr: die eCos Uhr

```
cyg_handle_t cyg_real_time_clock(void);
```

  - Abfragen:

```
cyg_tick_count_t cyg_current_time(void)
```

  - Handle auf Uhr-internen Zähler holen

```
void cyg_clock_to_counter(cyg_handle_t clock, cyg_handle_t* counter);
```

  - Inkrementieren:

```
void cyg_counter_tick(cyg_handle_t counter);
```

  - Uhr anlegen: `cyg_clock_create()`

[3] http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-clocks.html

eCos-*Alarm*[4] führt Aktion bei Erreichen eines Zählerstandes aus

1. Anlegen:

```
1 void cyg_alarm_create(cyg_handle_t counter,
2                       cyg_alarm_t* alarmfn,
3                       cyg_addrword_t data,
4                       cyg_handle_t* handle,
5                       cyg_alarm* alarm);
```

- `counter`: zugeordneter Zähler
- `alarmfn`: Alarmbehandlung (Funktionspointer)
- `data`: Parameter für Alarmbehandlung
- `handle`: Alarm Handle (vgl. Threaderzeugung)
- `alarm`: Speicher für Alarmobjekt (vgl. Threaderzeugung)

[4] http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-alarms.html

eCos-*Alarm*[4] führt Aktion bei Erreichen eines Zählerstandes aus

1. Anlegen:

```
1 void cyg_alarm_create(cyg_handle_t counter,
2                       cyg_alarm_t* alarmfn,
3                       cyg_addrword_t data,
4                       cyg_handle_t* handle,
5                       cyg_alarm* alarm);
```

- `counter`: zugeordneter Zähler
- `alarmfn`: Alarmbehandlung (Funktionspointer)
- `data`: Parameter für Alarmbehandlung
- `handle`: Alarm Handle (vgl. Threaderzeugung)
- `alarm`: Speicher für Alarmobjekt (vgl. Threaderzeugung)

☞ alarmfn wird im DSR-Kontext ausgeführt → `cyg_thread_resume()`

[4] http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-alarms.html

Alarme und periodische Aktivierung – 2

eCos-*Alarm*[5] führt Aktion bei Erreichen eines Zählerstandes aus

2. Alarminitialisierung:

```
1 void cyg_alarm_initialize(cyg_handle_t alarm,
2                           cyg_tick_count_t trigger,
3                           cyg_tick_count_t interval);
```

   - `alarm`: Alarmhandle
   - `trigger`: *Absolute* Zählerticks der *ersten* Aktivierung
     - Nutze `cyg_current_time() + x` $\rightsquigarrow$ *Phase*
     - Vorsicht: `cyg_current_time()` kann bei jedem Aufruf anderen Wert liefern
     - trigger muss in der Zukunft liegen. Warum?
   - `interval`: Zählerintervall für folgende *periodische* Aktivierungen

3. Alarm freischalten

```
1 void cyg_alarm_enable(cyg_handle_t alarm)
```

[5] http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-alarms.html

tt-eCos

eCos ist eigentlich *ereignisgesteuert*

$\rightsquigarrow$ Studienarbeit: Time-Triggered eCos

- Zeitgesteuerte Ausführung von Tasks in Ablauftabellen
- Terminüberwachung mit Ausnahmebehandlung
- Angelehnt an *OSEKtime* (Automobilstandard)

Ausführliche Dokumentation

$\rightarrow$ Ausarbeitung der Studienarbeit von Michael Lang:

`https://opus4.kobv.de/opus4-fau/files/674/sa_michael_lang.pdf`

tt-eCos Taskkonstruktion

Ablauftabellen und Tasks werden statisch (global) angelegt:

1. Definition der Ablauftabellen unter Angabe der maximalen Ereigniseinträge. (Makro!)

```
tt_DispatcherTable(string    <Tabellenname>,
                   tt_uint32 <Eintragsanzahl>)
```

2. Definition der Task(s) und Implementierung des Task-Programms

```
tt_Task ( string <Task-Name>) { .. Programm ..}
```

3. Definition des Idletasks und optionaler Hook-Routinen.

```
tt_IdleTask{.. Programm ..}
```

tt-eCos Initialisierung (1)

Initialisierung zur Laufzeit (in `cyg_user_start()`):

1. Initialisierung der Tasks unter Angabe ihrer Terminüberwachungsmethode

```
tt_InitTask (tt_tasktype       <Task-Name>,
             tt_deadlinemethod <Terminmethode>);
```

2. Initialisierung der Ablauftabelle(n)

```
tt_InitDispatcherTable( tt_dispatchertabletype <Tabellenname>)
```

- Mehrere Tabellen möglich

⇝ Wechsel zur Laufzeit

```
tt_statustype tt_switchtable(tt_dispatchertabletype <Tabellenname>)
```

tt-eCos Tabelleneinträge

- Definition der Ereignisse der einzelnen Tabellen.

```
1 tt_bool tt_DispatcherTableEntry(
2   tt_dispatchertabletype <Tabellenname>,
3   tt_ticktype            <Zeitpunkt>,
4   tt_action              <Ereignis>,
5   tt_tasktype            < Task-ID> )
```

- Starten des Betriebssystems.

```
1 void tt_startos( tt_dispatchertabletype <Anfangstabelle> )
```

Zeitpunkte?

Schon wieder Ticks...:

```
1 cyg_resolution_t ttEcos_get_resolution(void)
```

Terminüberwachung

Für jeden Thread mittels `tt_deadlinemethod` konfigurierbar:

- `TT_STRINGENT`: Strikte Terminüberprüfung
  - *direkt* nach Ablauf des Termins
- `TT_NONSTRINGENT`: Nicht-Strikte Terminüberprüfung
  - einem späteren Zeitpunkt
  - Terminverletzung möglich
  - Mehr Flexibilität und Effizienz

Einplanung von Taskstart oder Terminüberwachung (`tt_action`):

- `TT_START_TASK`: Task-Einplanung
- `TT_DEADLINE`: Terminüberprüfung

```
1 tt_bool tt_DispatcherTableEntry(
2       tt_dispatchertabletype <Tabellenname>,
3       tt_ticktype            <Zeitpunkt>,
4       tt_action              <Ereignis>,
5       tt_tasktype            <Task-ID>)
```

Ausführungsmodell in tt-eCos

- *Auftragsorientiertes* Ausführungsmodell ($\neq$ prozessorientiert!)
  - *keine* Endlosschleife in der Anwendung

  → Betriebssystem startet Faden, der Jobs abarbeitet und sich beendet
- Faden blockiert sich nie selbst
  - sonst würde kein Fortschritt mehr stattfinden

  → *run-to-completion-Semantik*

Vergleich mit eCos: *Prozessorientiertes* Ausführungsmodell

- Anwendungsthread implementiert *Endlosschleife* …
- …die sich blockiert und auf Ereignis wartet

Übersicht

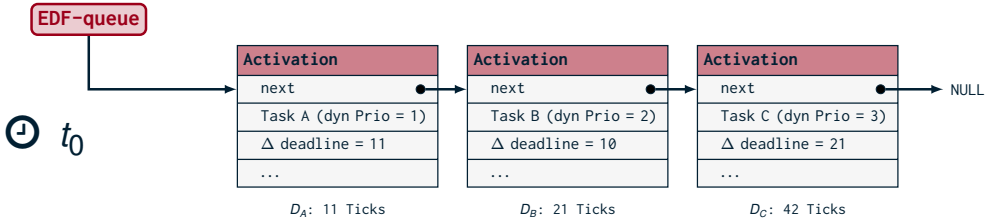
Wiederholung
- Antwortzeitanalyse
- Ereignisorientierter Planer
- Berechnungskomplexität
- Ereignisgesteuerte & zeitgesteuerte Echtzeitsysteme

eCos-Vertiefung
- Alarme
- Time-Triggered eCos

Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First

Hinweise zu Aufgabe 4
- Software-Tracing

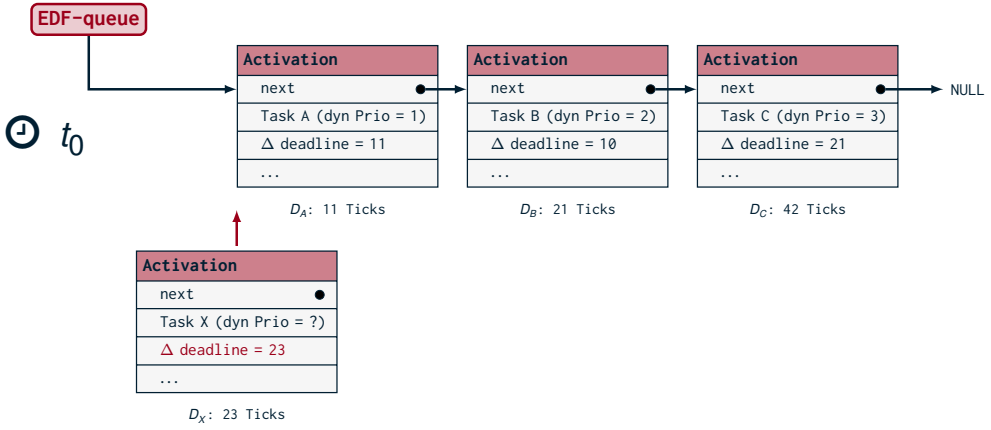
Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



Aktivierungsliste

- verwaltet Aktivierungen der einzelnen Prozesse
- sortiert nach der verbleibenden Zeit zum **relativen Termin**
- speichert Deltas

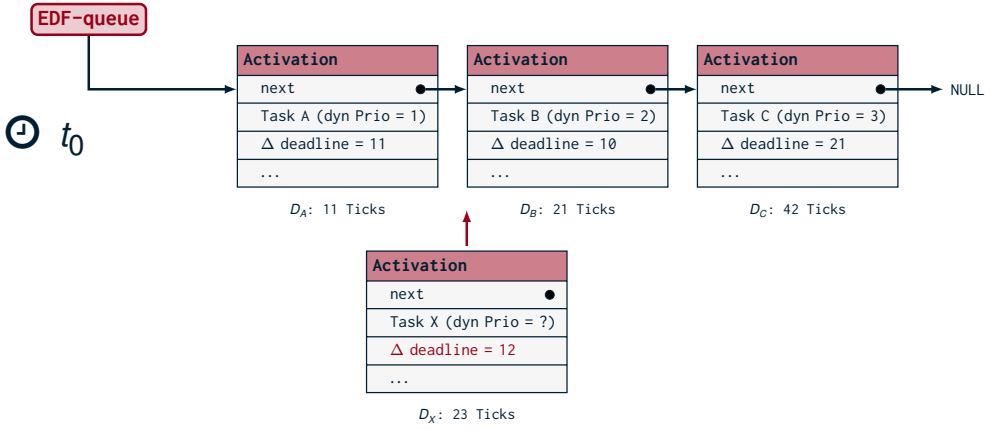
Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



`ezs_thread_resume(task_x)`

- Einfügeposition finden
- dabei Anpassung des mitgeführten Δ

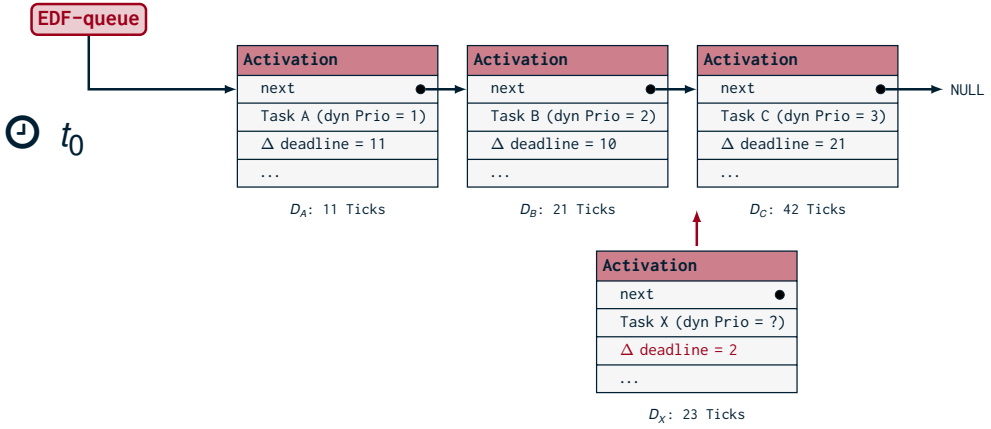
Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



`ezs_thread_resume(task_x)`

- Einfügeposition finden
- dabei Anpassung des mitgeführten Δ

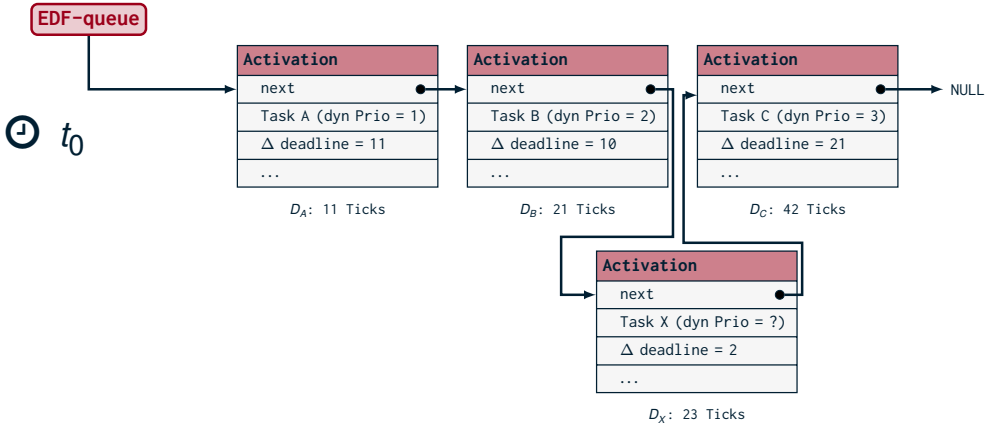
Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



`ezs_thread_resume(task_x)`

- Einfügeposition finden
- dabei Anpassung des mitgeführten Δ

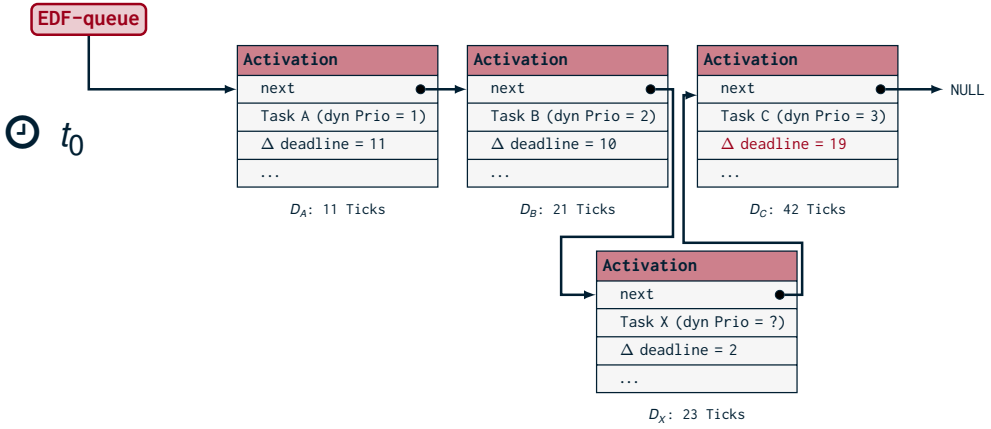
Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



`ezs_thread_resume(task_x)`

- Einfügeposition finden
- dabei Anpassung des mitgeführten Δ
- einfügen

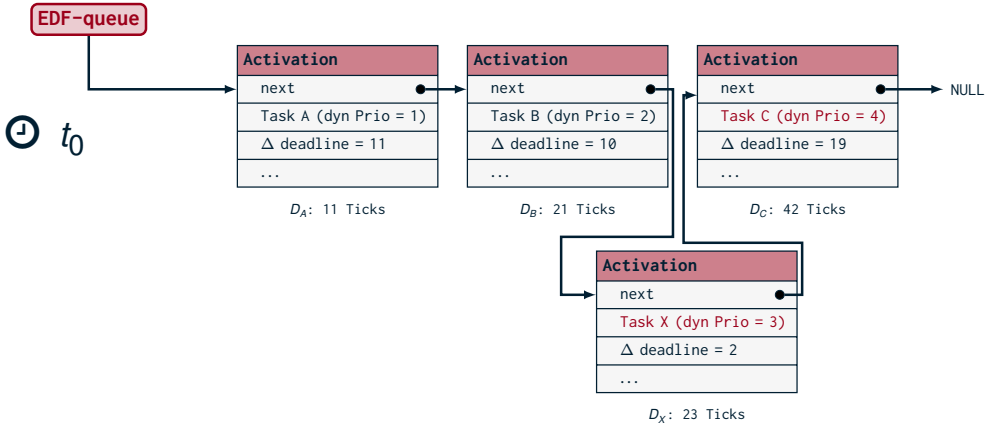
Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



`ezs_thread_resume(task_x)`

- Einfügeposition finden
- dabei Anpassung des mitgeführten Δ
- einfügen

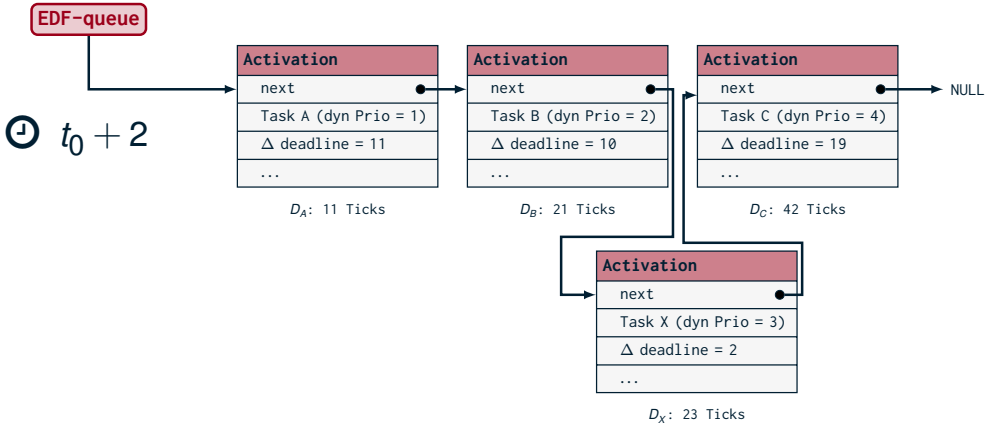
Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



`ezs_thread_resume(task_x)`

- Einfügeposition finden
- dabei Anpassung des mitgeführten Δ
- einfügen , Prioritäten anpassen

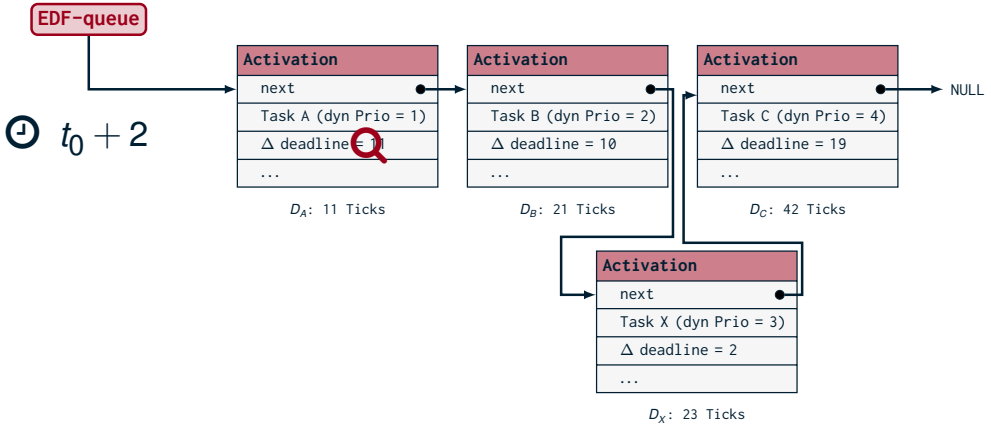
Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



`ezs_thread_suspend(task_a)`, 2 Ticks später

- Immer der erste Task in der Liste (warum?)

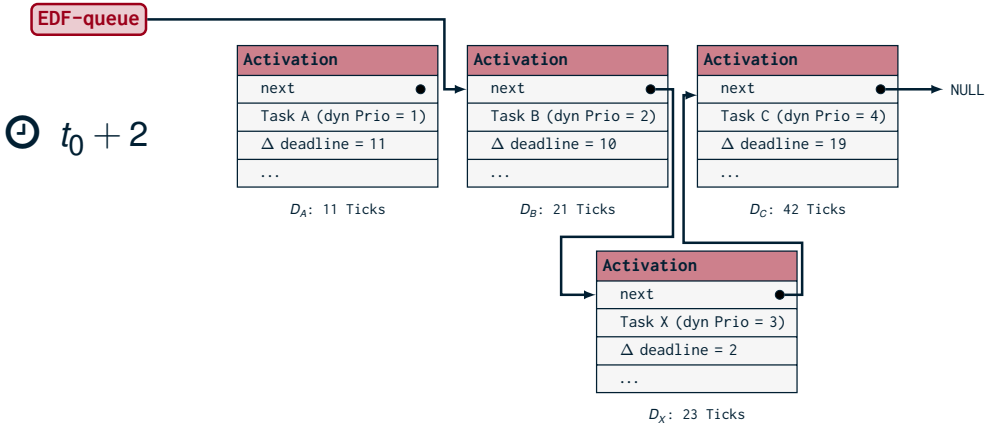
Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



`ezs_thread_suspend(task_a)`, 2 Ticks später

- Immer der erste Task in der Liste (warum?)
- Deadlineüberprüfung

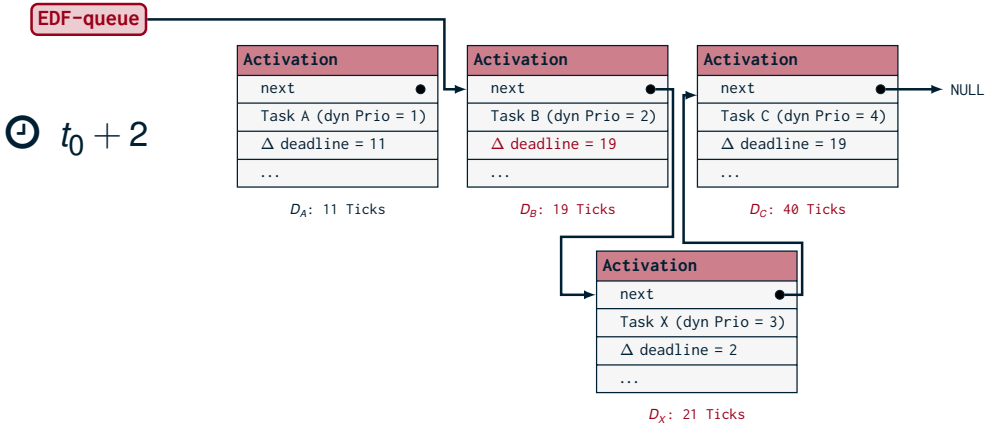
Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



`ezs_thread_suspend(task_a)`, 2 Ticks später

- Immer der erste Task in der Liste (warum?)
- Deadlineüberprüfung
- Entnahme aus der Liste

Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



`ezs_thread_suspend(task_a)`, 2 Ticks später

- Immer der erste Task in der Liste (warum?)
- Deadlineüberprüfung
- Entnahme aus der Liste - dabei Ticks “Einarbeiten”

Earliest-Deadline First – EZS und eCos

- Relative Deadlines von Tasks Speichern und Abrufen
  - Deadline mit einem Handle verknüpfen (während Systeminitialisierung)

```
1 void ezs_set_deadline(cyg_handle_t thread, cyg_addrword_t deadline);
```

  - Deadline abfragen

```
1 cyg_addrword_t ezs_get_deadline(cyg_handle_t thread);
```

- Prozesspriorität eines Tasks anpassen

```
1 void cyg_thread_set_priority(cyg_handle_t thread, cyg_priority_t priority);
```

- Eigene Funktionen für Taskstart und Ende bei EDF
  - ⇝ “Hook” für Kernfunktionen, durch euch zu erweitern
  - ⇝ Userland-Implementierung eines Einplaners

```
1 void ezs_thread_resume(cyg_handle_t handle); // wraps cyg_thread_resume
2 void ezs_thread_suspend(cyg_handle_t handle); // wraps cyg_thread_suspend
```

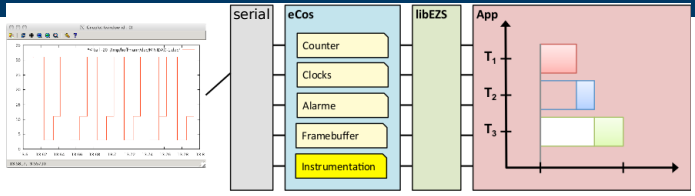
Übersicht

Wiederholung
- Antwortzeitanalyse
- Ereignisorientierter Planer
- Berechnungskomplexität
- Ereignisgesteuerte & zeitgesteuerte Echtzeitsysteme

eCos-Vertiefung
- Alarme
- Time-Triggered eCos

Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First

Hinweise zu Aufgabe 4
- Software-Tracing



- **Visualisierung der Threads** ⇝ Softwarebasiertes Tracing
- Threadidentifier je nach Schedulertyp: Priorität, ID, Threadhandle
  - ⇝ ET: **eindeutige Zuordnung** Faden → Priorität notwendig
- Hyperperiode standardmäßig auf 100 ms kodiert
- Verwendet den `ezs_counter`
  - ⇝ zu langes Sampling: Überlauf des Timers
- 256 Scheduling-Entscheidungen bis Plot angezeigt wird
  - Keine Anzeige nach wenigen Hyperperioden (einigen Sekunden)?
    - ⇝ Deadlock, Systemabsturz, zu wenige Aktivierungen
- Verwendet serielle Schnittstelle ☞ Cutecom schließen, bei Bedarf:

  `/tmp/$USER-ezs-serial`

Besprechung der Übungsaufgabe

„SimpleScope“