

Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Simple Scope

Simon Schuster **Peter Wägemann**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)
Lehrstuhl für Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)
<https://www4.cs.fau.de>

Sommersemester 2022



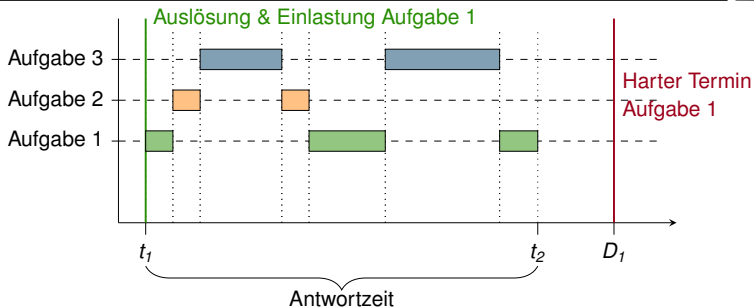
- 1 Wiederholung
 - Antwortzeitanalyse
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
 - Ereignisgesteuerte & zeitgesteuerte Echtzeitsysteme
- 2 eCos-Vertiefung
 - Alarme
 - Time-Triggered eCos
- 3 Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First
- 4 Hinweise zu Aufgabe 4
 - Software-Tracing



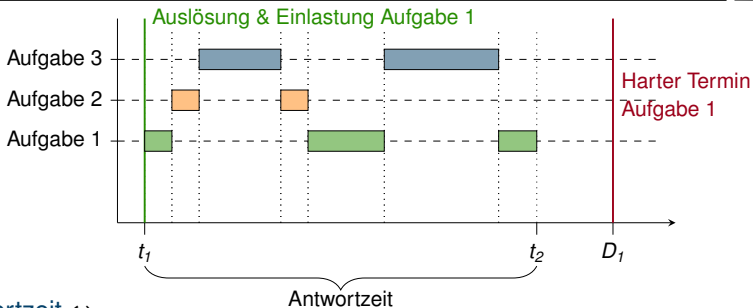
- 1 Wiederholung
 - Antwortzeitanalyse
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
 - Ereignisgesteuerte & zeitgesteuerte Echtzeitsysteme
- 2 eCos-Vertiefung
 - Alarme
 - Time-Triggered eCos
- 3 Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First
- 4 Hinweise zu Aufgabe 4
 - Software-Tracing



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



- 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



- 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, \dots, e_{i-1} der Aufgaben T_1, \dots, T_{i-1} höherer Priorität



- 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, \dots, e_{i-1} der Aufgaben T_1, \dots, T_{i-1} höherer Priorität
- Prüfung: $\omega_i(t) \leq t$
 - $t = j p_k; \quad k = 1, 2, \dots, i; \quad j = 1, 2, \dots, \lfloor \min(p_i, D_i) / p_k \rfloor$
 - Zeitbedarf erhöht sich nur bei Auslösung dringlicherer Aufgaben
 - Bis das Ereignis erneut eintritt/der Termin der Aufgabe erreicht ist



- 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, \dots, e_{i-1} der Aufgaben T_1, \dots, T_{i-1} höherer Priorität
- Prüfung: $\omega_i(t) \leq t$
 - $t = jp_k; \quad k = 1, 2, \dots, i; \quad j = 1, 2, \dots, \lfloor \min(p_i, D_i) / p_k \rfloor$
 - 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



Aufgabe T_i	<u>Periode p_i</u> ms	<u>WCET e_i</u> ms	<u>Termin D_i</u> 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
 - $\omega_2(3) = 1.5 + \left\lceil \frac{3}{3} \right\rceil 1 = 2.5 \leq 3 \rightsquigarrow$ zulässig
- Antwortzeit ω_3 von T_3
 - $\omega_3(3) = 1.25 + \left\lceil \frac{3}{3} \right\rceil 1 + \left\lceil \frac{3}{5} \right\rceil 1.5 = 3.75 > 3$
 - $\omega_3(5) = 1.25 + \left\lceil \frac{5}{3} \right\rceil 1 + \left\lceil \frac{5}{5} \right\rceil 1.5 = 4.75 \leq 5 \rightsquigarrow$ 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

- $\omega_2(3) = 1.5 + \left\lceil \frac{3}{3} \right\rceil 1 = 2.5 \leq 3 \rightsquigarrow$ zulässig

■ Antwortzeit ω_3 von T_3

- $\omega_3(3) = 1.25 + \left\lceil \frac{3}{3} \right\rceil 1 + \left\lceil \frac{3}{5} \right\rceil 1.5 = 3.75 > 3$

- $\omega_3(5) = 1.25 + \left\lceil \frac{5}{3} \right\rceil 1 + \left\lceil \frac{5}{5} \right\rceil 1.5 = 4.75 \leq 5 \rightsquigarrow$ zulässig

■ Antwortzeit ω_4 von T_4

- $\omega_4(3) = 0.5 + \left\lceil \frac{3}{3} \right\rceil 1 + \left\lceil \frac{3}{5} \right\rceil 1.5 + \left\lceil \frac{3}{7} \right\rceil 1.25 = 4.25 > 3$

- $\omega_4(5) = 0.5 + \left\lceil \frac{5}{3} \right\rceil 1 + \left\lceil \frac{5}{5} \right\rceil 1.5 + \left\lceil \frac{5}{7} \right\rceil 1.25 = 5.25 > 5$

- $\omega_4(6) = 0.5 + \left\lceil \frac{6}{3} \right\rceil 1 + \left\lceil \frac{6}{5} \right\rceil 1.5 + \left\lceil \frac{6}{7} \right\rceil 1.25 = 6.75 > 6$

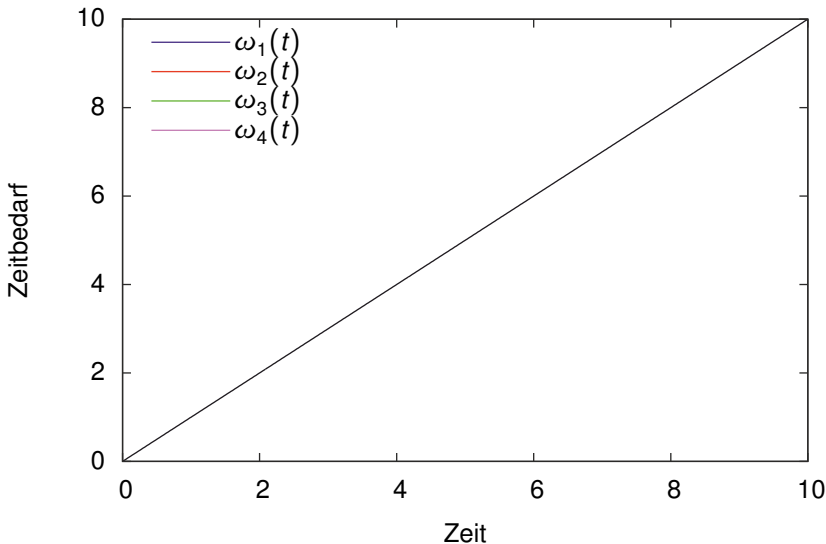
- $\omega_4(7) = 0.5 + \left\lceil \frac{7}{3} \right\rceil 1 + \left\lceil \frac{7}{5} \right\rceil 1.5 + \left\lceil \frac{7}{7} \right\rceil 1.25 = 7.75 > 7$

- $\omega_4(9) = 0.5 + \left\lceil \frac{9}{3} \right\rceil 1 + \left\lceil \frac{9}{5} \right\rceil 1.5 + \left\lceil \frac{9}{7} \right\rceil 1.25 = 9.00 \leq 9 \rightsquigarrow$ zulässig



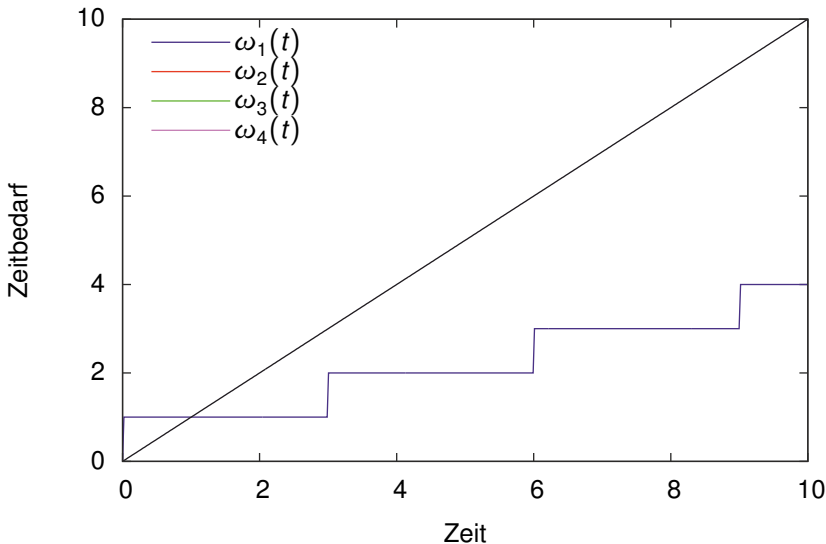
Beispiel: Berechnung der Zeitbedarfsfunktionen

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



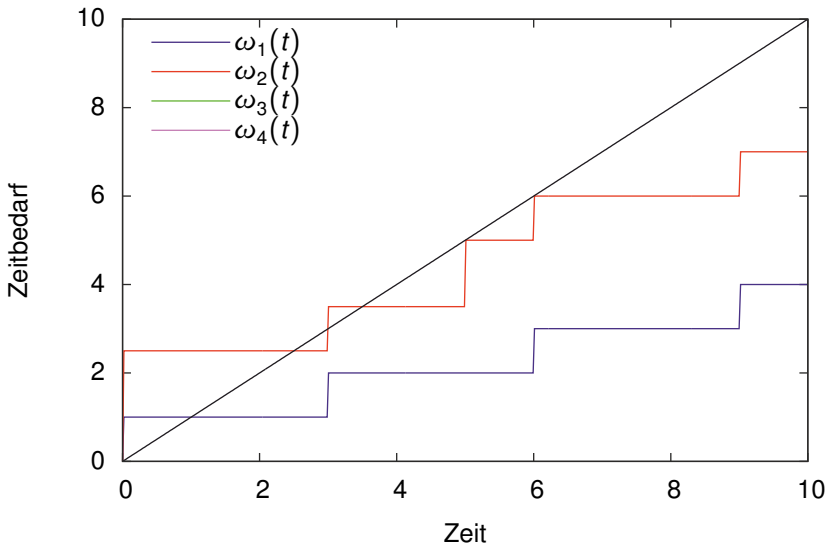
Beispiel: Berechnung der Zeitbedarfsfunktionen

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



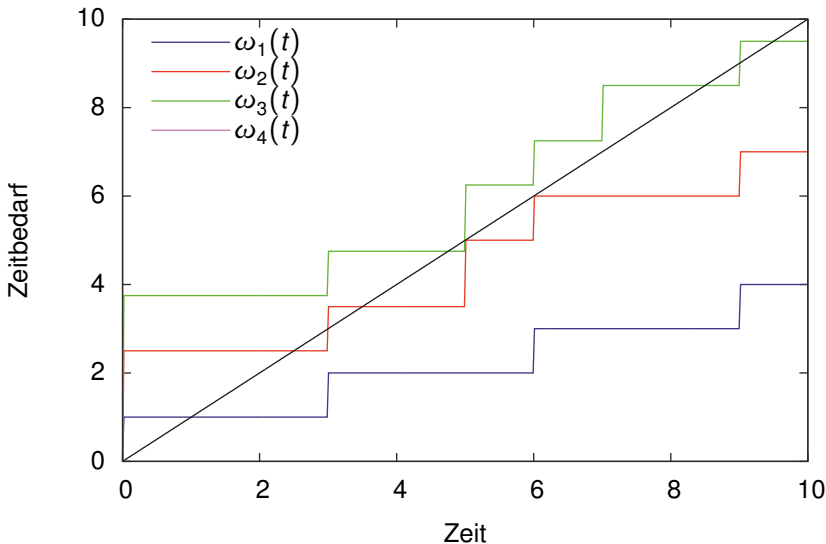
Beispiel: Berechnung der Zeitbedarfsfunktionen

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



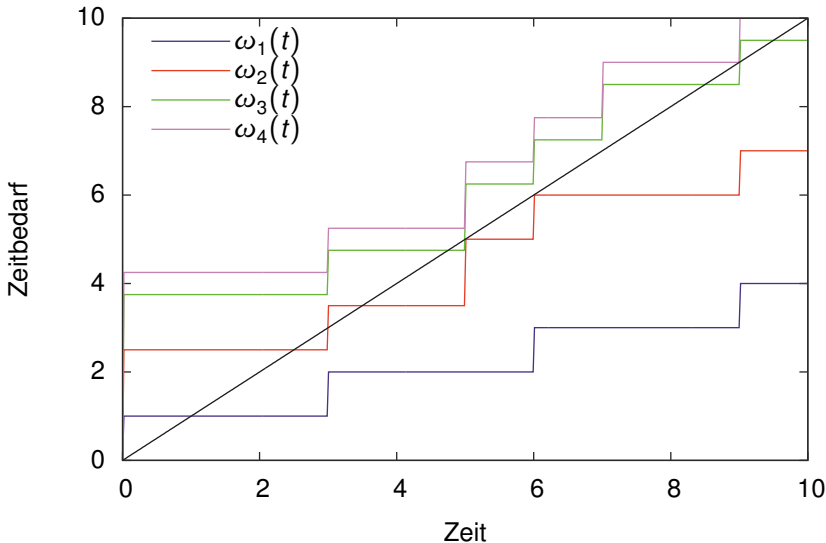
Beispiel: Berechnung der Zeitbedarfsfunktionen

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





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 unabhängig¹
- A6** Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar
- A7** Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

¹D.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

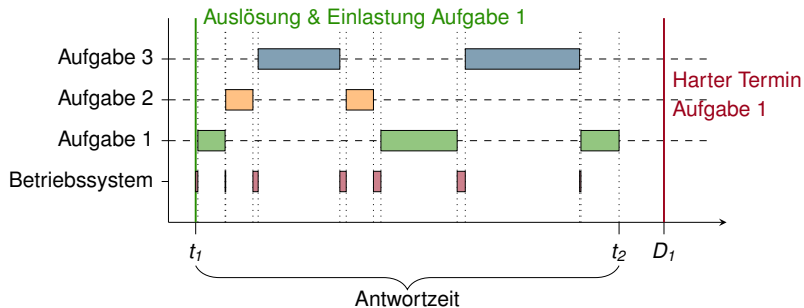
A5 Alle Aufgaben sind unabhängig¹

A6 Die Kosten durch Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung sind vernachlässigbar

A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

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





Praktische Betrachtung

Beruhet auf Voraussetzungen A1 – A7:

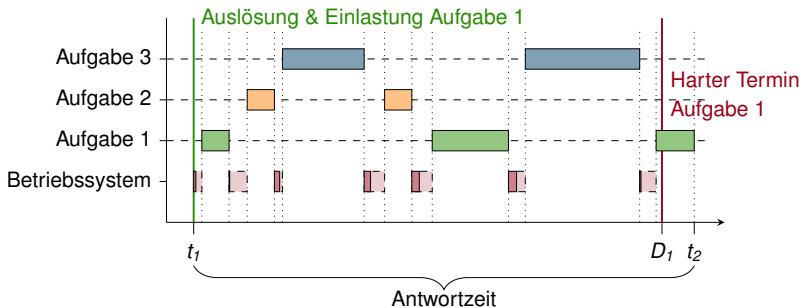
A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

~> Höherpriorere Aufgaben können jederzeit verdrängen

A6 Kosten von Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung vernachlässigbar



Antwortzeitanalyse



Praktische Betrachtung

Beruhet auf Voraussetzungen A1 – A7:

A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

↪ Höherpriorere Aufgaben können jederzeit verdrängen

A6 Kosten von Unterbrechungen, Ablaufplanung und Verdrängung vernachlässigbar





Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu **Ereigniszeitpunkten**

- Ihr Auftreten ist nicht (exakt) vorhersehbar
 - Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge
- Die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen **Dringlichkeit**





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





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*)



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



- 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 III-2/15 ff)
 - Konstant oder variabel, dann jedoch mit oberer Schranke → WCET
- Zum **Auslöse-** oder **Auswahlzeitpunkt** von Arbeitsaufträgen



- 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 III-2/15 ff)
 - 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



- 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 III-2/15 ff)
 - 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



- Ablaufliste \mapsto **Dynamische** Datenstruktur
 - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
 - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an
 - \rightarrow Eignung für die Implementierung **dynamischer Prioritäten**



- Ablaufliste \mapsto **Dynamische** Datenstruktur
 - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
 - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an
 - \rightarrow Eignung für die Implementierung **dynamischer Prioritäten**
 - Linearer Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
 - Vorabwissen zur **WCET des Sortiervorgangs** ist gefordert



- Ablaufliste \mapsto **Dynamische** Datenstruktur
 - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
 - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an
 - \rightarrow 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



- Ablaufliste \mapsto **Dynamische** Datenstruktur
 - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
 - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an
 - \rightarrow 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 \mapsto **Statische** Datenstruktur
 - Prioritäten werden fest auf Tabellenindizes abgebildet
 - Zur Laufzeit unveränderliches Gefüge absoluter Prioritäten
 - \rightarrow Eignung für die Implementierung **fester Prioritäten**



- **Ablaufliste** \mapsto **Dynamische** Datenstruktur
 - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
 - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an
 - \rightarrow 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

- **Ablauf Tabelle** \mapsto **Statische** Datenstruktur
 - Prioritäten werden fest auf Tabellenindizes abgebildet
 - Zur Laufzeit unveränderliches Gefüge absoluter Prioritäten
 - \rightarrow Eignung für die Implementierung **fester Prioritäten**
 - Konstanter Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
 - Aufträge durch indizierte Adressierung in die Tabelle aufnehmen
 - Ggf. ist ein Tabelleneintrag eine Auftragsliste (FIFO) gleicher Priorität



- **Ablaufliste** \mapsto **Dynamische** Datenstruktur
 - Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
 - Das (relative) Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an
 - \rightarrow 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

- **Ablauf Tabelle** \mapsto **Statische** Datenstruktur
 - Prioritäten werden fest auf Tabellenindizes abgebildet
 - Zur Laufzeit unveränderliches Gefüge absoluter Prioritäten
 - \rightarrow Eignung für die Implementierung **fester Prioritäten**
 - Konstanter Berechnungsaufwand zum Auslösezeitpunkt
 - Aufträge durch indizierte Adressierung in die Tabelle aufnehmen
 - Ggf. ist ein Tabelleneintrag eine Auftragsliste (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



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 $O(n)$



- Eine Ablaufliste je Priorität, organisiert als FIFO
- Ablauflisten werden in einer Ablaufabelle 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;
}
```

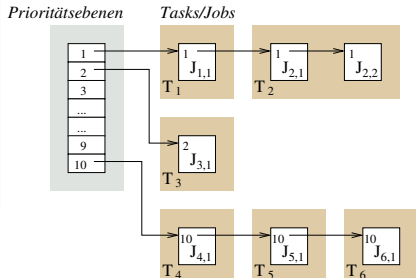


- Eine Ablaftliste je Priorität, organisiert als FIFO
- Ablaftlisten werden in einer Ablaftabelle verwaltet

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



Die Tücke liegt oft im Detail...

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



Auftragsauslösung mit **konstantem Aufwand $O(1)$** möglich?

1 Ablaufplan ist dynamische Datenstruktur (Tabelle) aus mehreren
Prioritätsebenen

Wartelisten \mapsto LIFO

Warteschlangen \rightsquigarrow FIFO



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

- 1 Ablaufplan ist dynamische Datenstruktur (Tabelle) aus mehreren Prioritätsebenen
 - Wartelisten \mapsto LIFO
 - Warteschlangen \leadsto FIFO
- 2 Aufträge die über denselben Tabelleneintrag erfasst werden besitzen dieselbe Priorität
 - Sonst könnte LIFO/FIFO **Prioritätsverletzung** zur Folge haben



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

- 1 Ablaufplan ist dynamische Datenstruktur (Tabelle) aus mehreren Prioritätsebenen
 - Wartelisten \mapsto LIFO
 - Warteschlangen \leadsto FIFO
- 2 Aufträge die über denselben Tabelleneintrag erfasst werden besitzen dieselbe Priorität
 - Sonst könnte LIFO/FIFO **Prioritätsverletzung** zur Folge haben
- 3 Anzahl der Tabelleneinträge entspricht mindestens der Anzahl statisch zugewiesener Prioritäten
 - Ggf. werden dann nahezu alle Tabelleneinträge nur einen Auftrag erfassen
 - Abhängig von der Echtzeitanwendung und dem Einplanungsverfahren



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

- 1 Ablaufplan ist dynamische Datenstruktur (Tabelle) aus mehreren Prioritätsebenen
 - Wartelisten \mapsto LIFO
 - Warteschlangen \leadsto FIFO
- 2 Aufträge die über denselben Tabelleneintrag erfasst werden besitzen dieselbe Priorität
 - Sonst könnte LIFO/FIFO **Prioritätsverletzung** zur Folge haben
- 3 Anzahl der Tabelleneinträge entspricht mindestens der Anzahl statisch zugewiesener Prioritäten
 - Ggf. werden dann nahezu alle Tabelleneinträge nur einen Auftrag erfassen
 - Abhängig von der Echtzeitanwendung und dem Einplanungsverfahren

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

- Leere Tabelleneinträge sind ggf. zu überspringen





Vorrangsteuerung ist mit grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:

- Entweder Auftragsauslösung oder Auftragsauswahl mit $O(1)$ zu versehen
 - Beides zugleich geht nicht





Vorrangsteuerung ist mit grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:

- Entweder Auftragsauslösung oder Auftragsauswahl mit $O(1)$ zu versehen
 - Beides zugleich geht nicht



Für Auftragsauslösung 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





Vorrangsteuerung ist mit grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:

- Entweder Auftragsauslösung oder Auftragsauswahl mit $O(1)$ zu versehen
 - Beides zugleich geht nicht



Für Auftragsauslösung 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 Auftragsauswahl in $O(1)$ spricht:

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





Vorrangsteuerung ist mit grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:

- Entweder Auftragsauslösung oder Auftragsauswahl mit $O(1)$ zu versehen
 - Beides zugleich geht nicht



Für Auftragsauslösung 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



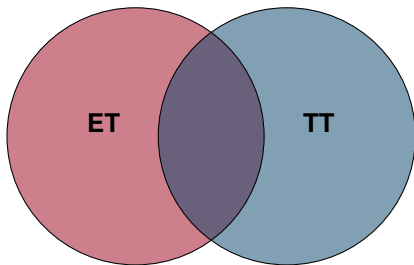
Für Auftragsauswahl in $O(1)$ spricht:

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

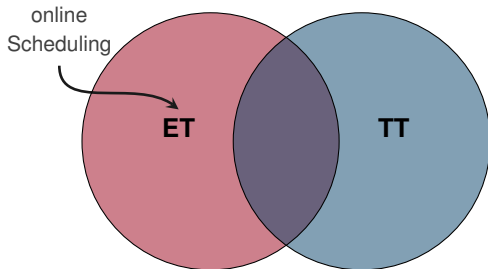
Linux (bis 2.6), Mach, QNX, . . . , VxWorks verhelfen Auftragsauslösung zu $O(1)$



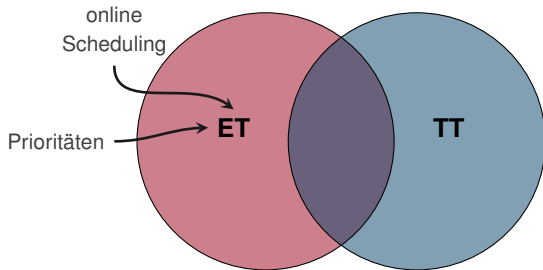
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



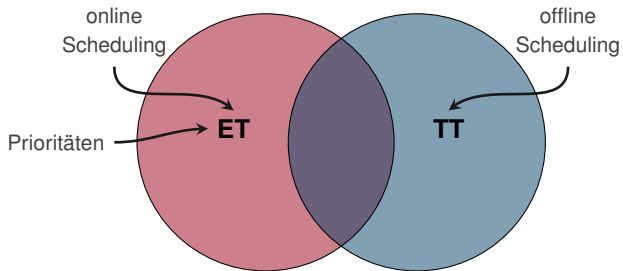
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



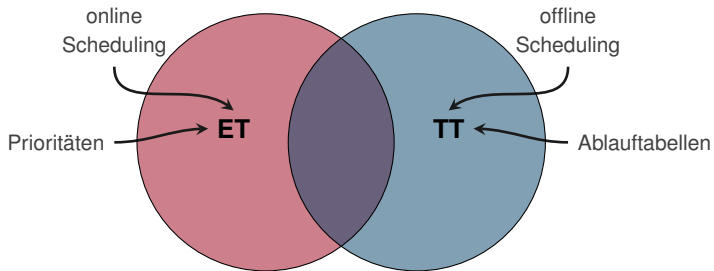
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



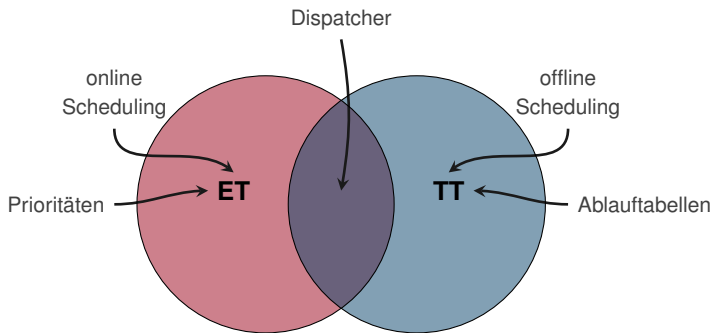
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



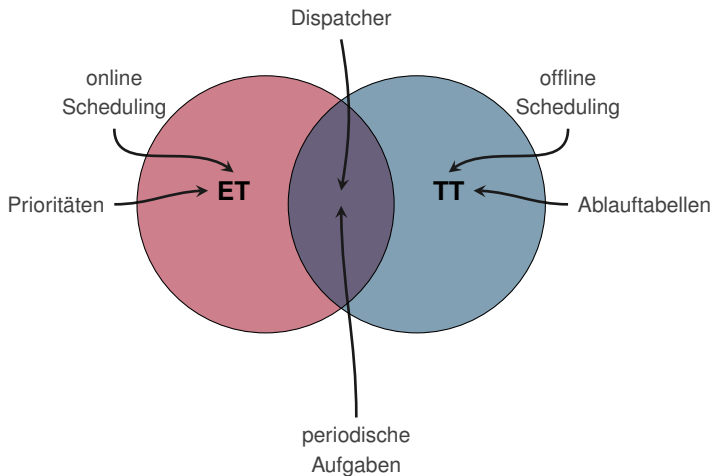
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



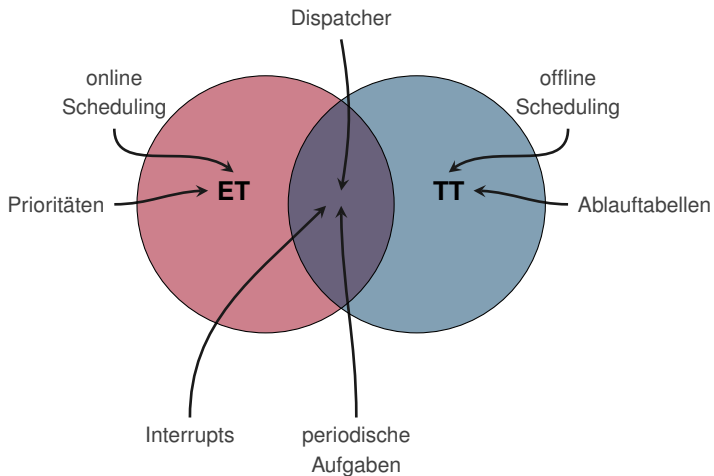
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



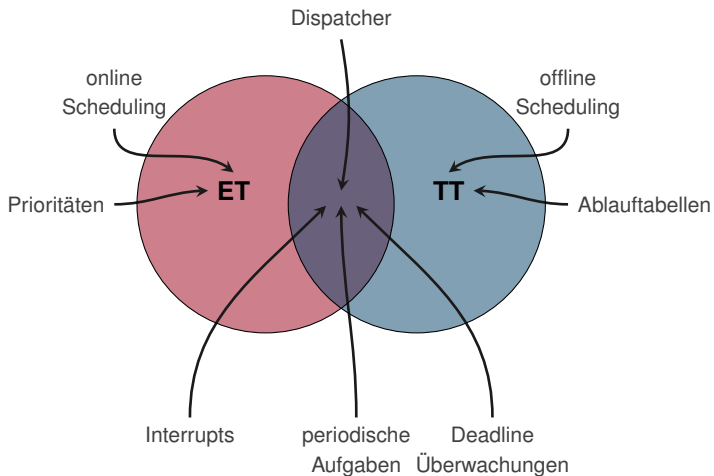
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



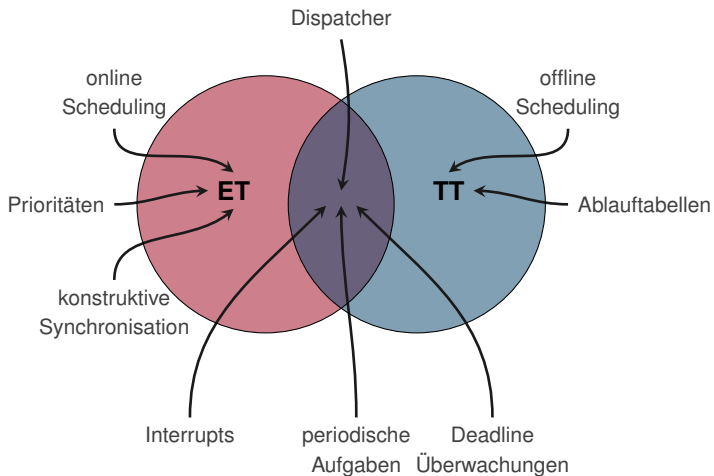
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



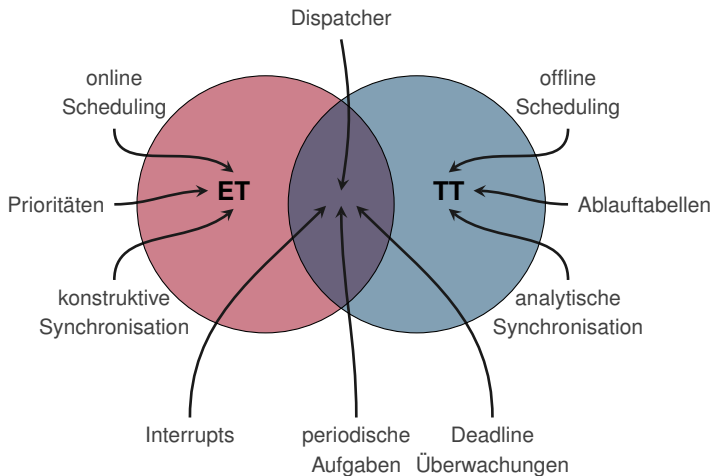
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



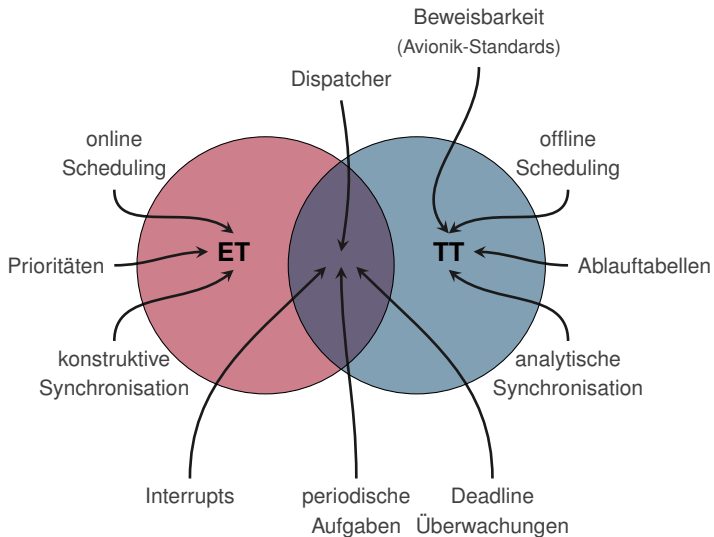
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



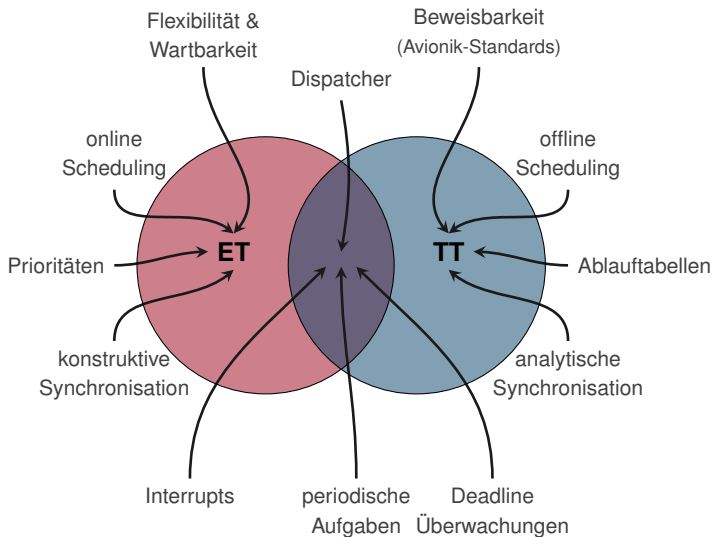
Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



1 Wiederholung

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

2 eCos-Vertiefung

- Alarme
- Time-Triggered eCos

3 Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First

4 Hinweise zu Aufgabe 4

- Software-Tracing



eCos-*Alarmer* basieren auf eCos-*Zählern* (Counter²)

■ Anlegen eines Zähler für bestimmtes Ereignis

```
1 void cyg_counter_create(cyg_handle_t* handle,  
2                       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>

eCos-*Uhren* (Clocks³) sind spezialisierte *Zähler*

- Basierend auf *Zeitgeberunterbrechung*
- Festgelegte Zeitauflösung beim Erstellen
- Einzige vorgegebene Uhr: die eCos Uhr

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

- Abfragen:

```
1 cyg_tick_count_t cyg_current_time(void)
```

- Handle auf Uhr-internen Zähler holen

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

- Inkrementieren:

```
1 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>

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>

eCos ist eigentlich *ereignisgesteuert*

~> Studienarbeit: Time-Triggered eCos

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

Ausführliche Dokumentation

→ Ausarbeitung der Studienarbeit von Michael Lang:

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



Ablauf Tabellen und Tasks werden statisch (global) angelegt:

- 1 Definition der Ablauf Tabellen unter Angabe der maximalen Ereigniseinträge. (Makro!)

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

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

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

- 3 Definition des Idletasks und optionaler Hook-Routinen.

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



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

1 Initialisierung der Tasks unter Angabe ihrer Terminüberwachungsmethode

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

2 Initialisierung der Ablauftabelle(n)

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

■ Mehrere Tabellen möglich

~> Wechsel zur Laufzeit

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



■ 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)
```



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_dispatcherdecltype <Tabellenname>,  
3     tt_ticktype           <Zeitpunkt>,  
4     tt_action             <Ereignis>,  
5     tt_tasktype          <Task-ID>)
```



- *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



1 Wiederholung

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

2 eCos-Vertiefung

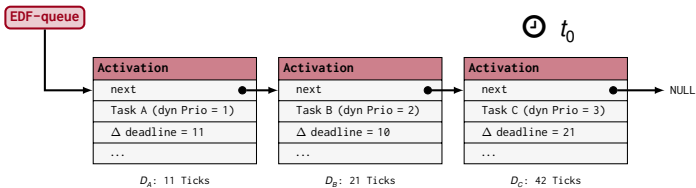
- Alarme
- Time-Triggered eCos

3 Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First

4 Hinweise zu Aufgabe 4

- Software-Tracing

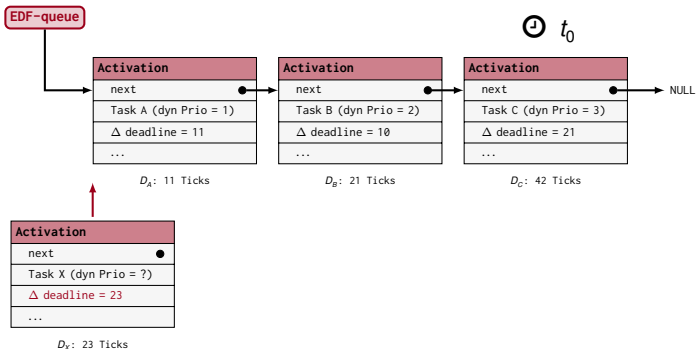




Aktivierungsliste

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

Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze

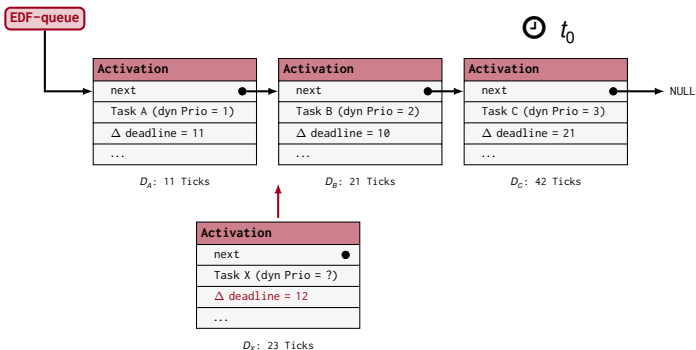


`ezs_thread_resume(task_x)`

- Einfügeposition finden
- dabei Anpassung des mitgeführten Δ



Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze

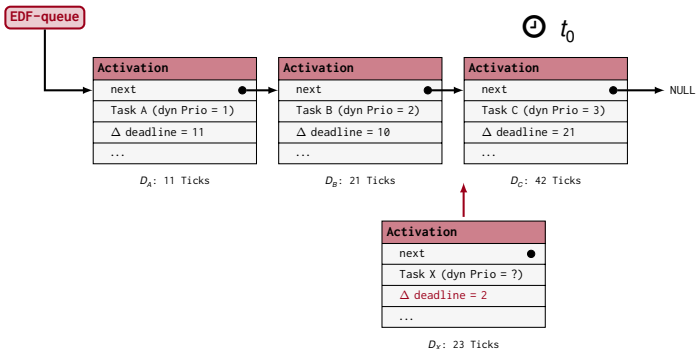


ezs_thread_resume(task_x)

- Einfügeposition finden
- dabei Anpassung des mitgeführten Δ



Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze

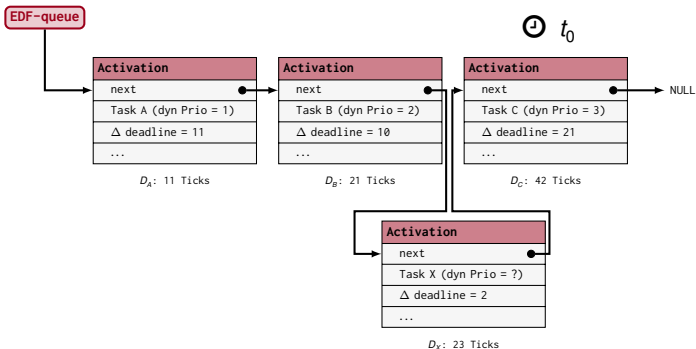


ezs_thread_resume(task_x)

- Einfügeposition finden
- dabei Anpassung des mitgeführten Δ



Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze

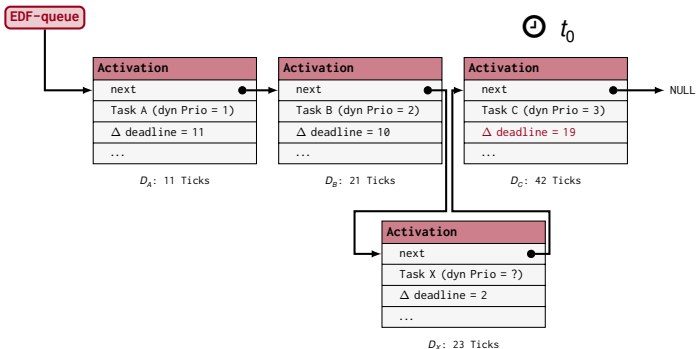


ezs_thread_resume(task_x)

- Einfügeposition finden
- dabei Anpassung des mitgeführten Δ
- einfügen



Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze

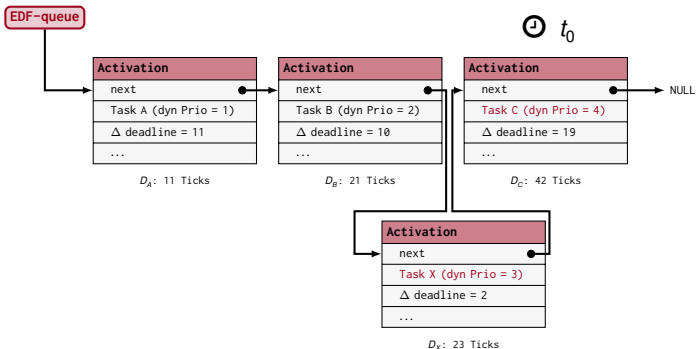


ezs_thread_resume(task_x)

- Einfügeposition finden
- dabei Anpassung des mitgeführten Δ
- einfügen



Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze

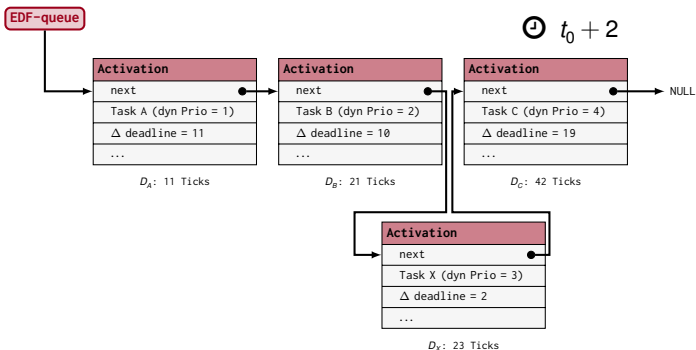


ezs_thread_resume(task_x)

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



Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze

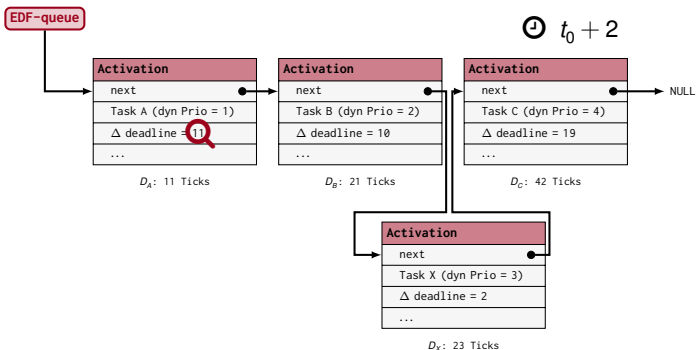


ezs_thread_suspend(task_a), **2 Ticks später**

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



Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze

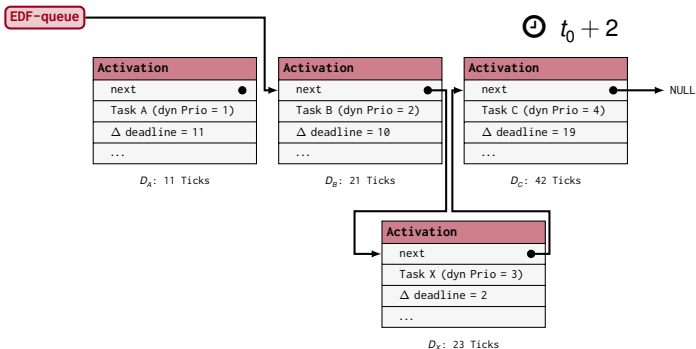


`ezs_thread_suspend(task_a)`, **2 Ticks später**

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



Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze

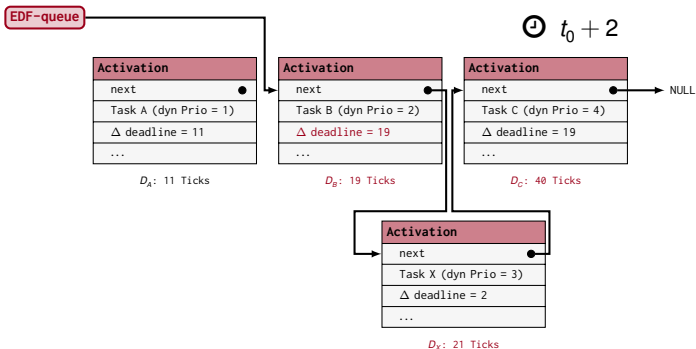


`ezs_thread_suspend(task_a)`, **2 Ticks später**

- 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,  
2                     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,  
2                             cyg_priority_t priority);
```

■ Eigene Funktionen für Taskstart und Ende bei EDF

~> “Hook” für Kernfunktionen, durch euch zu erweitern

~> Userland-Implementierung eines Einplaners

```
1 // Wraps cyg_thread_resume(cyg_handle_t);  
2 void ezs_thread_resume(cyg_handle_t handle);
```

```
1 // Wraps cyg_thread_suspend(cyg_handle_t);  
2 void ezs_thread_suspend(cyg_handle_t handle);
```



1 Wiederholung

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

2 eCos-Vertiefung

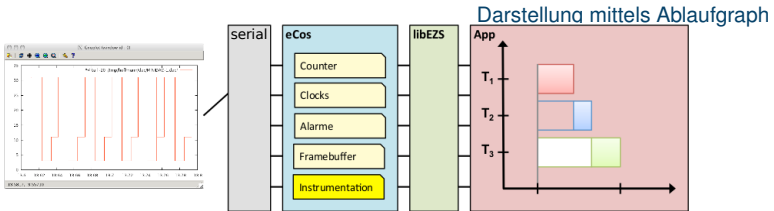
- Alarme
- Time-Triggered eCos

3 Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First

4 Hinweise zu Aufgabe 4

- Software-Tracing





- **Visualisierung der Threads** ~ Softwarebasiertes Tracing
- Threadidentifizier je nach Schedulingtyp: **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“

