

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

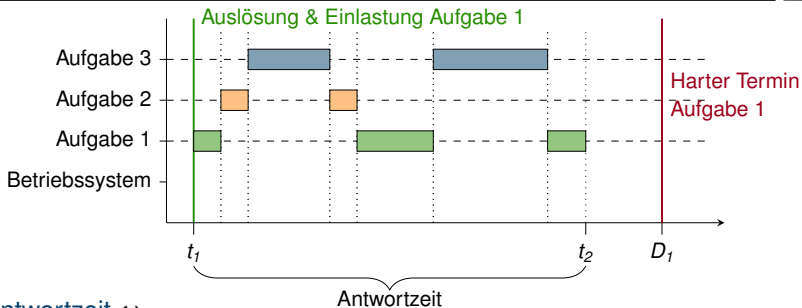
3 Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First

4 Hinweise zu Aufgabe 4

- Software-Tracing



Antwortzeitanalyse



■ 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:

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

- 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

■ 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

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

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

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

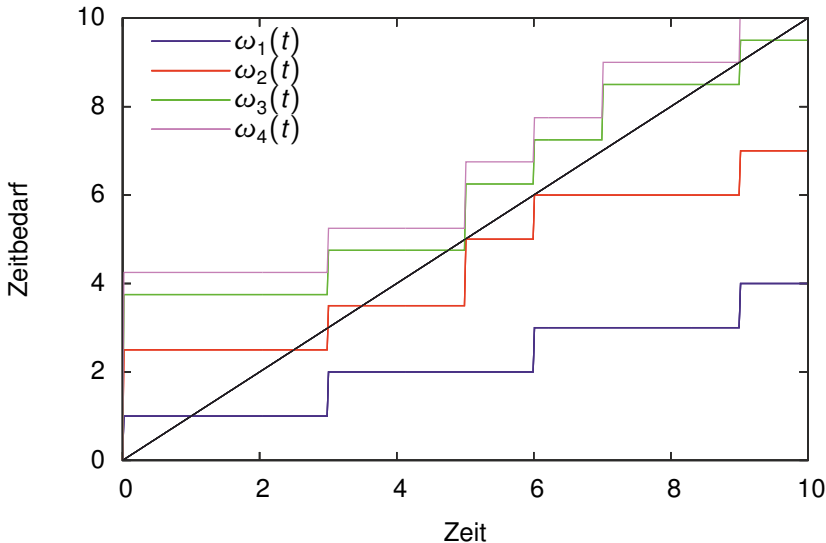
- $\omega_4(7) = 0.5 + \left\lceil \frac{7}{3} \right\rceil 1 + \left\lceil \frac{7}{5} \right\rceil 1.5 + \left\lceil \frac{7}{7} \right\rceil 1.25 = 7.75 > 7$

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



Beispiel: Berechnung der Zeitbedarfsfunktionen

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





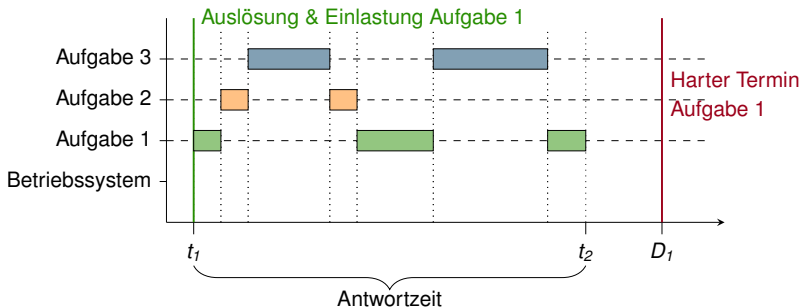
Mathematische Ansätze zur zeitlichen Analyse periodischer Echtzeitsysteme bedingen häufig **starke Einschränkungen**:

- 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.



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**



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



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**
 - 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;
}
```

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 $O(n)$

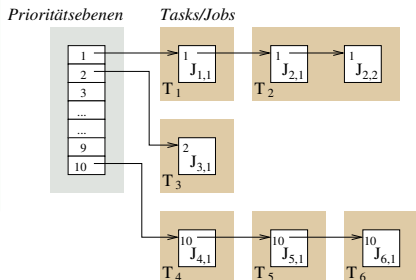


- Eine Ablauffliste je Priorität, organisiert als FIFO
- Ablaufflisten werden in einer Ablauffabelle verwaltet

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



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



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



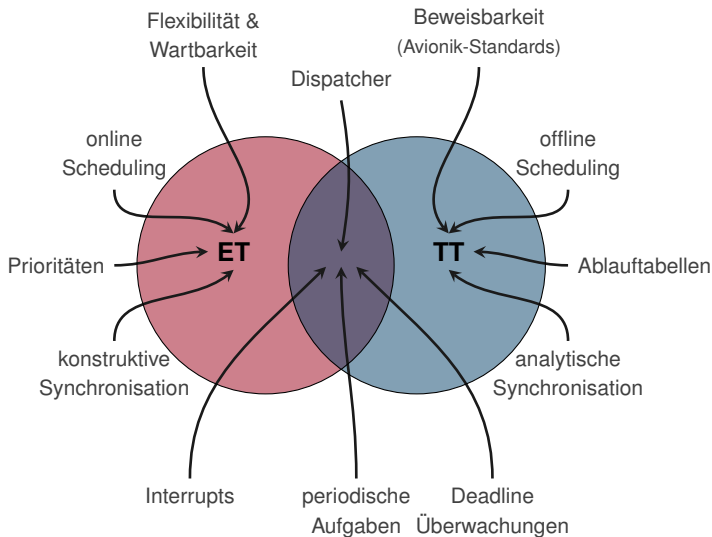
Für Auftragsauswahl in $O(1)$ spricht:

- 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



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)

 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 Ablaufabelle(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_dispatcher_tabletype <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

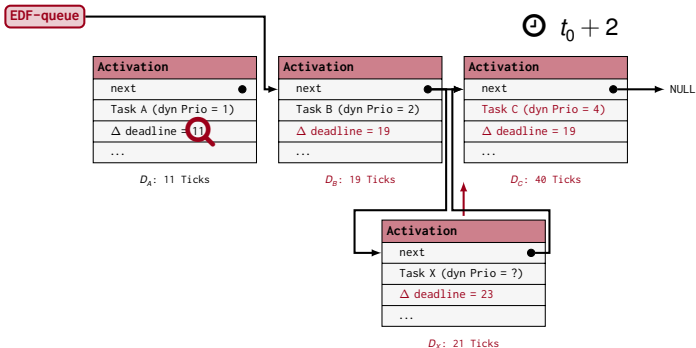
3 Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First

4 Hinweise zu Aufgabe 4

- Software-Tracing



Earliest-Deadline First – Implementierungsskizze



Aktivierungsliste

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



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

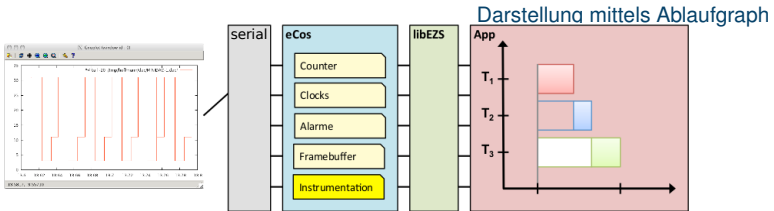
- Alarme
- Time-Triggered eCos

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

