

Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Simple Scope

Simon Schuster **Phillip Raffeck**

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

Wintersemester 2019/20



Übersicht

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

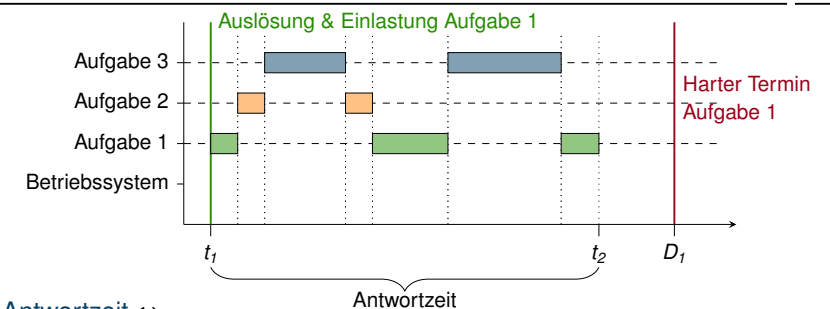


Übersicht

- 1 Wiederholung
 - Antwortzeitanalyse
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
 - Ereignisgesteuerte & zeitgesteuerte Echtzeitsysteme
- 2 eCos-Vertiefung
 - Alarmer
 - 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



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



Restriktionen des periodischen Modells



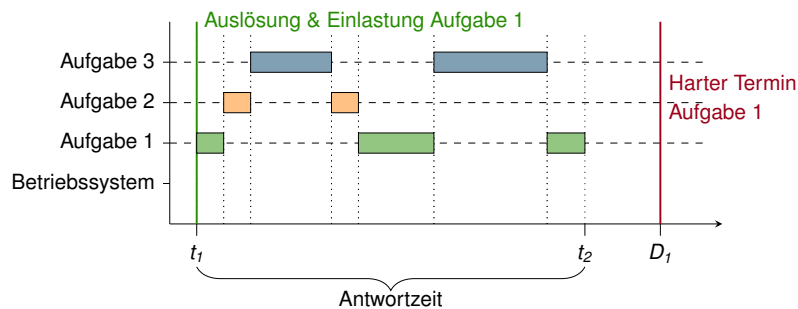
Mathematische Ansätze zur zeitlichen Analyse periodischer Echtzeitsysteme bedingen häufig **starke Einschränkungen**:

- 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.



Antwortzeitanalyse



Praktische Betrachtung

Beruhet auf Voraussetzungen A1 – A7:

- A7** Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv

~> hochpriorer 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**



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** → 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



Aufbau und Berechnungskomplexität

Feste/Dynamische Prioritäten und Ablauf Tabellen/-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
- **Ablauf Tabelle** → **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 Auftragsliste (FIFO) gleicher Priorität
 - Linearer Berechnungsaufwand zum Auswahlzeitpunkt
 - Vorabwissen zur **WCET des Suchvorgangs** ist gefordert
 - Tabelleneinträge können leer sein und sind zu überspringen



Berechnungskomplexität (Forts.)

Ablaufliste vs. Ablauf Tabelle

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 $O(1)$

Ablauf Tabelle

```

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 Ablauf Tabelle

- Eine Ablaufliste je Priorität, organisiert als **FIFO**
- Ablauflisten werden in einer Ablauf Tabelle verwaltet

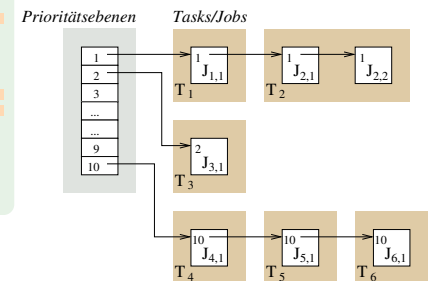
Multi-Level-Queue

```

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...

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

- 1 Ablaufplan ist dynamische Datenstruktur (Tabelle) aus mehreren Prioritätsebenen
 - Wartelisten \rightarrow LIFO
 - Warteschlangen \rightsquigarrow 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

Auftragswahl 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 Auftragslösung oder Auftragswahl mit $O(1)$ zu versehen
 - Beides zugleich geht nicht



Für Auftragslösung 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

\rightarrow Ereignisbedingte Auftragverzögerungen lassen sich exakt bestimmen



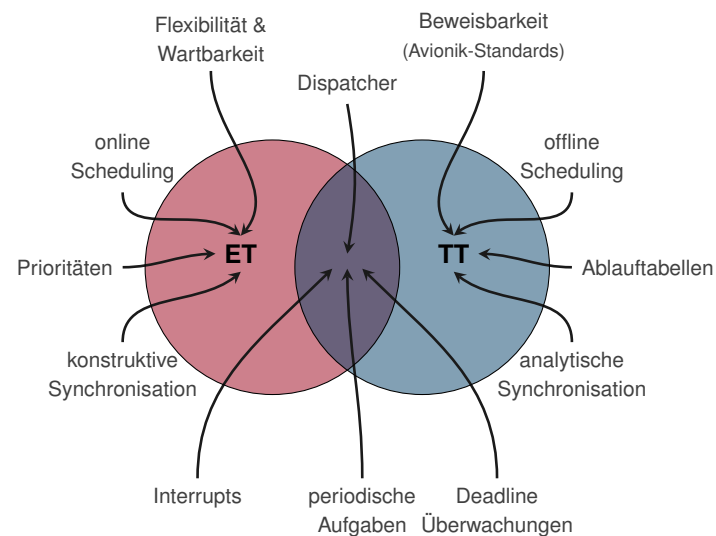
Für Auftragswahl in $O(1)$ spricht:

- 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 Auftragslösung zu $O(1)$



Ereignisgesteuerte vs. zeitgesteuerte EZS



Übersicht

- 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



Alarmer und periodische Aktivierung

eCos-Zähler-Abstraktion

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>

Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel VI Simple Scope
3 eCos-Vertiefung–3.1 Alarmer

17/32

Alarmer und periodische Aktivierung

eCos-Uhr

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>

Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel VI Simple Scope
3 eCos-Vertiefung–3.1 Alarmer

18/32

Alarmer und periodische Aktivierung – 1

Anlegen eines Alarms

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>

Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel VI Simple Scope
3 eCos-Vertiefung–3.1 Alarmer

19/32

Alarmer und periodische Aktivierung – 2

eCos-Alarm

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()* + $x \sim Phase$
 - **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>

Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel VI Simple Scope
3 eCos-Vertiefung–3.1 Alarmer

20/32

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 Ablauf Tabelle(n)

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

- Mehrere Tabellen möglich

~> Wechsel zur Laufzeit

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



- Definition der Ereignisse der einzelnen Tabellen.

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

- Starten des Betriebssystems.

```
1 void tt_startos( tt_dispatcher_tabletype <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_dispatcherabletype <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

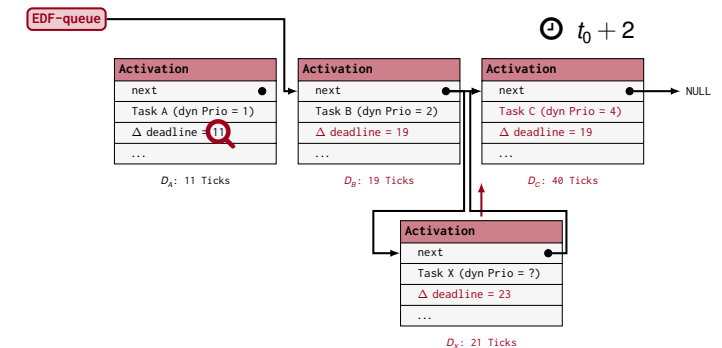


Übersicht

- 1 Wiederholung
 - Antwortzeitanalyse
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
 - Ereignisgesteuerte & zeitgesteuerte Echtzeitsysteme
- 2 eCos-Vertiefung
 - Alarmer
 - 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



- Einfügeposition finden

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);
```



Übersicht

1 Wiederholung

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

2 eCos-Vertiefung

- Alarmer
- Time-Triggered eCos

3 Dynamische Prioritäten: Earliest-Deadline First

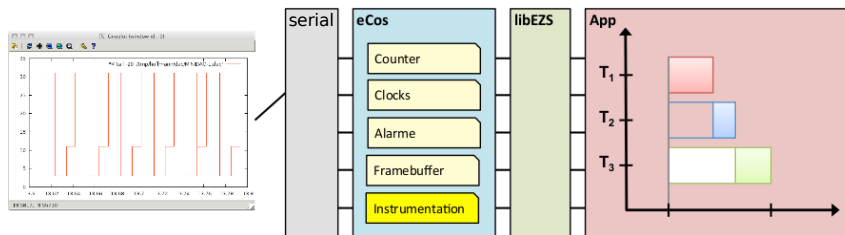
4 Hinweise zu Aufgabe 4

- Software-Tracing



Software-Tracing

Darstellung mittels Ablaufgraph



Visualisierung der Threads ~> Softwarebasiertes Tracing

Threadidentifizierung 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

