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

23. November 2018

Vorgriffe

Zwei Vorgriffe auf Inhalte der Vorlesung

- Für Übungbetrieb notwendig
- Inhalte

1. Zeitgesteuerte Echtzeitsysteme
   - Vorlesung: zeitgesteuerte Ablaufplanung
   - Übung: Vergleich zeit- vs. ereignisgesteuerte EZS
   - tt-eCos vs. eCos?
2. Ausführungsmodelle
   - Vorlesung: Rangfolge
   - Übung: Ausführungsmodell von eCos?

Übersicht

1. Wiederholung
   - Ereignisorientierter Planer
   - Berechnungskomplexität
   - Ereignisgesteuerte & zeitgesteuerte Echtzeitsysteme
2. eCos-Vertiefung
   - Alarme
   - Time-Triggered eCos
3. Hinweise zu Aufgabe 4
   - Graphische Ausgabe
   - Software-Tracing

Übersicht

1. Wiederholung
   - Ereignisorientierter Planer
   - Berechnungskomplexität
   - Ereignisgesteuerte & zeitgesteuerte Echtzeitsysteme
2. eCos-Vertiefung
   - Alarme
   - Time-Triggered eCos
3. Hinweise zu Aufgabe 4
   - Graphische Ausgabe
   - Software-Tracing

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 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

Berechnungskomplexität (Forts.)

Ablaufliste vs. Ablauftabelle

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;
}
```

⚠ Fest 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

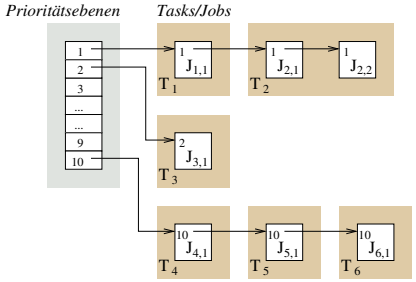
```
Job* table[Jobs];

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;
}
```

- 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?

1. Ablaufplan ist dynamische Datenstruktur (Tabelle) aus mehrere Prioritätsebenen
   - Wartelisten ↦ LIFO
   - Warteschlangen ⇝ 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

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

☞ 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

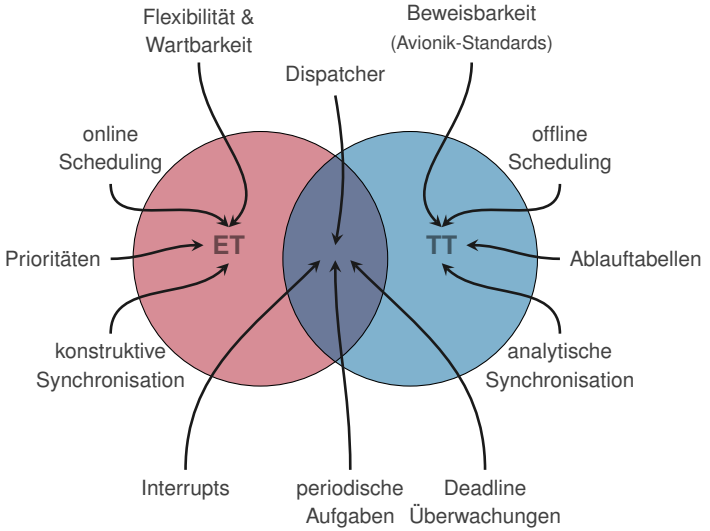
→ Ereignisbedingte Auftragverzögerungen lassen sich exakt bestimmen

☞ 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



Übersicht

Alarme und periodische Aktivierung

eCos-Zähler-Abstraktion

eCos-*Alarme* basieren auf eCos-*Zählern* (Counter[1])

- 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);
```

[1] http://ecos.sourceware.org/docs-1a/ref/kernel-counters.html

Alarme und periodische Aktivierung

eCos-Uhr

eCos-*Uhren* (Clocks[2]) 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()`

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

Alarme und periodische Aktivierung – 1

Anlegen eines Alarms

eCos-*Alarm*[3] 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()`

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

Alarme und periodische Aktivierung – 2

eCos-*Alarm*[4] 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` ⇝ *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)
```

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

tt-eCos

eCos ist eigentlich *ereignisgesteuert*

⇝ Studienarbeit: Time-Triggered eCos

- Zeitgesteuerte Ausführung von Tasks in Ablauftabellen
- 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`

tt-eCos Taskkonstruktion

Ablauftabellen und Tasks werden statisch (global) angelegt:

1 Definition der Ablauftabellen 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 ..}
```


tt-eCos Initialisierung

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>)
```

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 (≠ prozessorientiert!)
  - *keine* Endlosschleife in der Anwendung

  → Betriebssystem startet Faden, der Jobs abarbeitet und sich beendet
- Einlastung erfolgt *verdrängend*
  - Neue Aufgabe unterbricht Ausführung laufender Aufgabe
  - Anschliessend Fortsetzung der unterbrochenen Aufgabe

  → Terminüberprüfung möglich
- *Aber:* Faden blockiert sich nie selbst
  - sonst würde kein Fortschritt mehr stattfinden

  → *run-to-completion-Semantik*

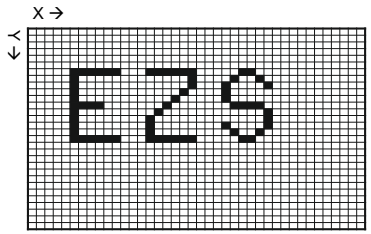
Vergleich mit eCos: *Prozessorientiertes* Ausführungsmodell

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

Übersicht

Grafische Ausgabe – Das Display

Framebuffer Grundlagen



- **Framebuffer** ⇝ Grafische Ausgabe
- eCos bietet einheitliche, *hardwareunabhängig Schnittstelle*
- Darstellung auf Host-PC: `ezs_*` ⇝ `make doc`
- Auflösung in unserem Fall: 800x600
  - Zwecks Portabilität immer Variablen nutzen:
  - Breite: `CYG_FB_WIDTH(FRAMEBUF)`
  - Höhe: `CYG_FB_HEIGHT(FRAMEBUF)`

Grafische Ausgabe – Das Display

Einschränkungen

- `printf` geht nicht mehr
  ⇝ `ezs_printf` verwenden
- Serieller Port wird gemultiplext
  - Cutecom muss ab sofort neues serielles Gerät verwenden
  ⇝ `/tmp/<username>-ezs-serial`
- In Cutecom Version 0.30 ist Terminal-Pfad nicht mehr frei konfigurierbar
  - Cutecom 0.22 im CIP installiert
  ⇝ `/proj/i4ezs/tools/cutecom`
- Wir unterstützen nur eine beschränkte Anzahl Farben
  ⇝ `libEZS/include/ezs_io_fel.h`
- Gängige Probleme:
  - Fehlende Ausgaben (Text/Framebuffer)
  - Fehlerhafte Ausgaben im cutecom: `5c63:RPC:GUI:fill_block...`
  ⇝ Überlappende Ausgaben: XTerm des Framebuffers beachten

ADC – Analog-Digital-Converter

- Erfassen analoger Spannungen
- Inverse Operation des DACs
- Kenngrößen
  - Abtastrate 10e3–10e9 Samples pro Sekunde (kSPS–GSPS)
  - Auflösung 10-24 Bit
  - Latenz zwischen Messung und Verfügbarkeit der Werte

☞ Bei uns:

- „simulierter“ ADC mit verrauschtem Muster → „unendliche“ Abtastfrequenz
- 8 bit Auflösung

Zugriff

```
1 void ezs_adc_init(void)
2
3 uint8_t ezs_adc_get(void)
```


Leistungsdichtespektrum in libEZS

```
1 void ezs_power_density_spectrum(float in[], float out[], int N)
```

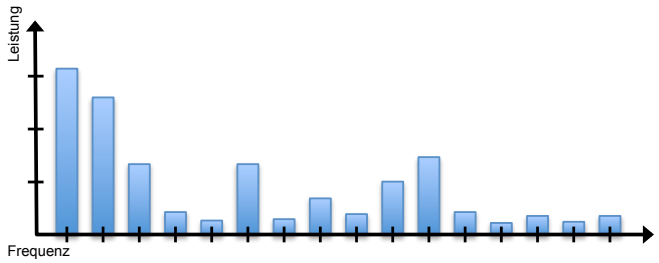
- `in[]` *Eingabe*, Abschnitt des Zeitbereichssignals
- `out[]` *Ausgabe*, Leistungsdichtespektrum (LDS)
- N *Anzahl der Abtastwerte*, wobei N Zweierpotenz

- Zeitbereichssignal der Länge $N \mapsto$ LDS[5] der Länge $\frac{N}{2}$
- Höchste Frequenz im Spektrum aus Abtasttheorem

$$\Rightarrow f_{max} = \frac{f_{Abtast}}{2} \quad (1)$$

[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_density

LDS – Beispiel

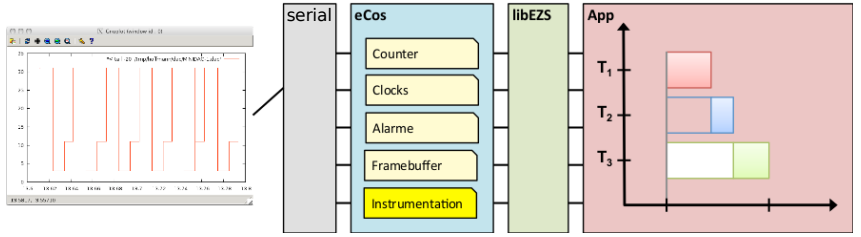


- Darstellung mit 16 Werten:
  → LDS der Länge 32 notwendig
- 1Hz Abstand ⇝ Spektrum bis 16 Hz erfassen
  → Abtastfrequenz 32 Hz

☞ Balken repräsentieren Leistung

Software-Tracing

Darstellung mittels Ablaufgraph



- **Visualisierung der Threads** ⇝ Softwarebasiertes Tracing
- eCos Instrumentations[6]
- Ausgabe der Priorität ⇝ *Ablaufgraph*

⇝ **eindeutige Zuordnung** Faden → Priorität notwendig

[6] http://ecos.sourceware.org/docs-latest/user-guide/kernel-instrumentation.html