Echtzeitsysteme

Abfertigung periodischer Echtzeitsysteme

Lehrstuhl Informatik 4

7. November 2013

Gliederung

1. Überblick
2. Periodische Aufgaben
   - Zeitparameter periodischer Aufgaben
   - Periodische Echtzeitanwendungen
   - Restriktionen
3. Ereignisgesteuerte Ausführung
   - Feste und dynamische Prioritäten
   - Verdrängbarkeit
   - Ereignisorientierter Planer
   - Berechnungskomplexität
4. Zeitgesteuerte Ausführung
   - Naive Implementierung
   - Ablauftabellen
   - Einlastung und Laufzeitkontrolle
   - Stapelbasierte Ablaufplanung
5. Zusammenfassung

Fragestellungen

- Was zeichnet periodische Echtzeitsysteme aus?
  - Welches Vorabwissen ist in solchen Systemen verfügbar?
  - Reicht dies aus, um sinnvolle Anwendungen umzusetzen?
  - Welchen Restriktionen unterliegen solche Echtzeitsysteme?
- Basismechanismen für die Abarbeitung periodischer Jobs
  - Ereignisgesteuerte Ausführung
    - ereignisorientierte Einplanung
    - feste und dynamische Prioritäten
    - Berechnungskomplexität: Ablauftabelle vs. Ablaufliste
  - Zeitgesteuerte Ausführung
    - „*Busy Loop*“ vs. Ablauftabellen
    - zeitgesteuerte Abfertigung von Arbeitsaufträgen

Gliederung

1. Überblick
2. Periodische Aufgaben
   - Zeitparameter periodischer Aufgaben
   - Periodische Echtzeitanwendungen
   - Restriktionen
3. Ereignisgesteuerte Ausführung
   - Feste und dynamische Prioritäten
   - Verdrängbarkeit
   - Ereignisorientierter Planer
   - Berechnungskomplexität
4. Zeitgesteuerte Ausführung
   - Naive Implementierung
   - Ablauftabellen
   - Einlastung und Laufzeitkontrolle
   - Stapelbasierte Ablaufplanung
5. Zusammenfassung

Periodische Aufgabe (engl. *periodic task*)

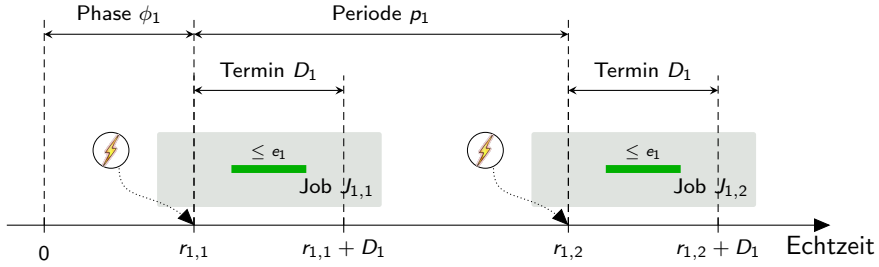
Vorabwissen

Aufgaben, die in (halb-) regelmäßigen Zeitintervallen kontinuierlich eine vorgegebene Systemfunktion erbringen[1]. Jede periodische Aufgabe $T_i = (p_i, e_i, D_i, \phi_i)$ ist eine Abfolge von Arbeitsaufträgen mit

- p_i der Periode (engl. *period*)
- e_i der maximalen Ausführungszeit (WCET)
- D_i dem relativen Termin (engl. *deadline*)
- ϕ_i der Phase (engl. *phase*)

[1] Nach [1] ist eine periodische Aufgabe nicht wirklich periodisch, da die Abstände zwischen den Auslösezeiten (engl. *interrelease time*) eines Arbeitsauftrags einer periodischen Aufgabe nicht der Periode selbst entsprechen müssen. Anderswo werden solche Aufgaben verschiedentlich als sporadische Aufgaben bezeichnet.

Periodische Aufgaben auf der Echtzeitachse



Ausführungszeit e_i maximale Ausführungszeit aller Jobs $J_{i,j}$ in T_i

relativer Termin D_i maximale Zeitspanne zwischen Auslösezeit $r_{i,j}$ und Fertigstellung eines Jobs $J_{i,j}$ in T_i

Periode p_i minimale Länge aller Zeitintervalle $[r_{i,j}; r_{i,j+1}]$ zwischen den Auslösezeiten der Jobs in T_i

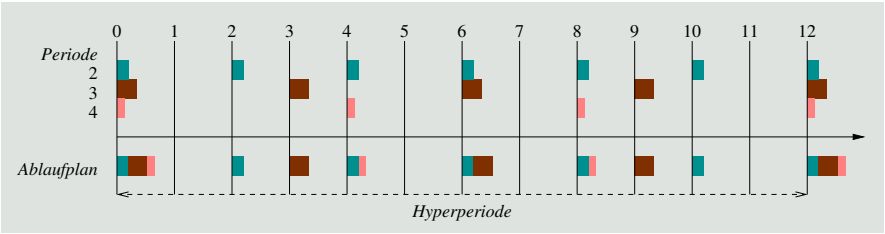
Phase ϕ_i Auslösezeit $r_{i,1}$ des ersten Jobs $J_{i,1}$ in T_i

Hyperperiode

Mix verschiedener Aufgaben mit unterschiedlichen Perioden

Zeitintervall, in dem alle periodischen Aufgaben (mindestens einmal) durchgelaufen sind und erneut zusammen zur Ausführung anstehen:

- Hyperperiode H, das kleinste gemeinsame Vielfache aller Perioden
- führt ggf. zu Schwankungen in den Einlastungszeiten



- maximale Anzahl aller Arbeitsaufträge in H ist $\sum_{i=1}^{n} H/p_i$
  - im vorliegenden Beispiel: $(12/2) + (12/3) + (12/4) = 13$

Periodische Echtzeitsysteme in der Praxis

Kann man Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?

Echtzeitrechensysteme berechnen Stellwerte für Aktoren oft ohne ein zugrunde liegendes konventionelles Kontrollsystem

- das kontrollierte Objekt erfährt dann eine direkte digitale Kontrolle
- die Kontrollanwendungen zeigen dabei eine hohe Regelmäßigkeit
  - eine meist endlose Sequenz von Kontrollperioden

Rückgekoppelte Kontrollschleife (engl. *feedback control loop*)

```
initialisiere Stellwert;
initialisiere Zeitgeber und Unterbrecher;
bei Zeitgeberunterbrechung erledige      /* abtasten, regeln, steuern */
    A/D-Wandlung der Echtzeitinstanz, Echtzeitabbild ziehen;
    Echtzeitdatenbasis aktualisieren, neuen Stellwert berechnen;
    D/A-Wandlung des Stellwerts, Echtzeitinstanz verändern;
basta.
```

Periodische Echtzeitsysteme in der Praxis (Forts.)

Kann man Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?

periodische Regelungsaufgaben:

- alle 3 ms z.B. Sensorabtastung, Sensordatenfusion, Fluglageregelung
- alle 9 ms z.B. Höhenregelung

☞ Die zeitliche Auflösung (d^{sample}) der Regelung richtet sich nach der Objektdynamik (d^{object} bzw. d^{rise}).

Restriktionen des periodischen Modells

Verzicht auf Entwicklungskomfort zugunsten einer realistischeren Analyse

Mathematische Ansätze zur Analyse periodischer Echtzeitsysteme schränken solche Systeme häufig stark ein:

- A1 Alle Aufgaben sind periodisch.
- A2 Alle Arbeitsaufträge können an ihren Auslösezeitpunkten eingeplant und ausgeführt werden.
- A3 Termine und Perioden sind identisch.
- A4 Kein Arbeitsauftrag gibt die Kontrolle über den Prozessor ab.
- A5 Alle Aufgaben sind unabhängig voneinander, d.h. die einzige gemeinsame Ressource ist die CPU und es existieren keine Einschränkungen hinsichtlich der Auslösezeiten der Arbeitsaufträge.
- A6 Der Overhead durch Unterbrechungen, Ablaufplanung oder Verdrängung ist vernachlässigbar.
- A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv.

Implikationen

Einschränkungen, die Einfluss auf Anwendungen ausüben

Betriebsmittel *gemeinsame Betriebsmittel sind nicht möglich*!

- gemeinsame Betriebsmittel $\rightsquigarrow$ implizieren Synchronisation
- Aufgaben sind nicht mehr unabhängig

⚡ I4Copter: mehrere Sensoren am selben SPI-Bus

Rangordnung *komplexe Aufgaben können nicht geteilt werden*!

- eine komplexe Aufgabe wird in mehrere, einfachere Aufgaben aufgeteilt, die kooperativ einen Dienst zur Verfügung stellen
- Aufgaben sind nicht mehr unabhängig

⚡ I4Copter: Datenverarbeitung in Filter, Fusion und Regelung trennen

Kommunikation *Aufgaben können nicht synchron kommunizieren*!

- synchroner Nachrichtenversand/-empfang
- Aufgaben sind nicht mehr unabhängig

Gliederung

1 Überblick
2 Periodische Aufgaben
- Zeitparameter periodischer Aufgaben
- Periodische Echtzeitanwendungen
- Restriktionen

3 Ereignisgesteuerte Ausführung
- Feste und dynamische Prioritäten
- Verdrängbarkeit
- Ereignisorientierter Planer
- Berechnungskomplexität

4 Zeitgesteuerte Ausführung
- Naive Implementierung
- Ablauftabellen
- Einlastung und Laufzeitkontrolle
- Stapelbasierte Ablaufplanung

5 Zusammenfassung

Ereignisorientierte Einplanung

(engl. *event-driven scheduling*)

Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu Ereigniszeitpunkten, die zufällig auftreten und somit nicht vorhersehbar sind

- die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen Dringlichkeit
- Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge

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

feste Zuordnung $\mapsto$ Ereignisverarbeitung/-auslöser
- gibt Arbeitsaufträgen eine absolute Priorität

variable Zuordnung $\mapsto$ Ereignisverarbeitung
- gibt Arbeitsaufträgen eine relative Priorität

☞ auch: prioritätsorientierte Einplanung (engl. *priority-driven scheduling*)

Prioritätsorientierte Algorithmen

Klassifikation

Verfahren zur prioritätsorientierten Einplanung periodischer Jobs werden in zwei Gruppen eingeteilt:

feste Priorität (engl. *fixed priority* oder *static priority*)
- alle Jobs einer Task haben dieselbe unveränderliche Priorität
- d.h., die Taskpriorität ist relativ zu anderen Tasks fest, unabhängig von der Auslösung bzw. Beendigung von Jobs

$\rightsquigarrow$ Prioritäten werden statisch vor der Laufzeit an Aufgaben verteilt

dynamische Priorität (engl. *dynamic priority*)
- die Jobs einer Task können verschiedene Prioritäten haben
- d.h., die Taskpriorität variiert relativ zu anderen Tasks, wenn Jobs ausgelöst bzw. beendet werden

$\rightsquigarrow$ Prioritäten werden dynamisch zur Laufzeit an Arbeitsaufträge vergeben

Verfeinerte Klassifikation

Ein Frage der Betrachtungsebene...

Praxisrelevanz haben Verfahren, die den Jobs feste Prioritäten zuweisen
- die Zuweisung erfolgt jedoch zum Auslösezeitpunkt eines Jobs
  - wenn er ereignisbedingt auf die Bereitliste (engl. *ready list*) kommt
- einmal zugewiesen, bleibt die Priorität eines ausgelösten Jobs gleich
  - jedoch immer nur in Relation zu allen anderen Jobs auf der Bereitliste
- auf Jobebene sind die Prioritäten fest, auf Taskebene aber variabel

Konsequenz daraus: verschiedene Kategorien von Einplanungsalgorithmen

feste Priorität wie gehabt (S. IV-1/14)

dynamische Priorität auf Taskebene (engl. *task-level dynamic-priority*)

feste Priorität auf Jobebene (engl. *job-level fixed-priority*)

dynamische Priorität auf Jobebene (engl. *job-level dynamic-priority*)

☞ dynamische Priorität $\mapsto$ dynamisch auf Task- und fest auf Jobebene

Verdrängbarkeit

Verschränkung (engl. *interleaving*) von Arbeitsaufträgen

Arbeitsaufträge könn(t)en verschränkt ausgeführt werden, wenn ...
- der Planer (engl. *scheduler*) dynamisch, ereignisgesteuert arbeitet
- die Zeitbedingungen (engl. *time constraints*) es erlauben

Präemptivität (engl. *preemptivity*), eine Eigenschaft, die in Abhängigkeit von jedem einzelnen Arbeitsauftrag gesehen werden muss

verdrängbar (engl. *preemptable*) ist ein Arbeitsauftrag, wenn seine Ausführung suspendiert werden darf

an beliebigen Stellen (engl. *full preemptive*)

an ausgewiesenen Stellen (engl. *preemption points*)

unverdrängbar (engl. *non-preemptable*), sonst
- der Job muss durchlaufen (engl. *run to completion*)

☞ ggf. Mischbetrieb $\rightsquigarrow$ Präemptivität als Jobattribut implementiert

Ereignisorientierter Planer

(engl. *event-driven scheduler*)

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

- der Vorgang ist gekoppelt mit der Einlastung: *online scheduling*
- kritisch ist die Berechnungskomplexität und wann sie anfällt
  - konstant oder variabel, dann jedoch mit oberer Schranke $\mapsto$ WCET
  - zum Auslöse- oder Auswahlzeitpunkt von Arbeitsaufträgen

Sortierschlüssel (engl. *sort key*) zur Reihung eines Arbeitsauftrags ist die ihm zugeordnete Priorität

- ergibt sich ggf. erst zum Ereigniszeitpunkt aus der Priorität der von ihm zu verarbeitenden Klasse von Ereignissen
- ist eindeutig abzubilden auf einen endlichen Wertebereich

☞ auch: prioritätsorientierter Planer (engl. *priority-driven scheduler*)

Berechnungskomplexität

Zeitpunkte ihrer Wirksamwerdung

Auslösezeitpunkt (nach dem Ereigniszeitpunkt)

- konstanter Aufwand, im Falle einer Ablauftabelle
  - Jobs durch indizierte Adressierung in die Tabelle aufnehmen
  - ggf. ist ein Tabelleneintrag eine Jobliste (FIFO) gleicher Priorität
- (beschränkter) linearer Aufwand, im Falle einer Ablaufliste
  - Vorabwissen zur WCET des Sortiervorgangs ist gefordert

Auswahlzeitpunkt (nach dem Auslöse-, vor dem Einlastungszeitpunkt)

- nahezu konstanter Aufwand, im Falle einer Ablaufliste
  - Jobs vom Kopf her der (ggf. einfach verketteten) Liste entnehmen
- beschränkter linearer Aufwand, im Falle einer Ablauftabelle
  - 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;
  Job* tail = list;

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

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

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

`release` $O(n)$

`extract` nahezu $O(1)$

Ablauftabelle

```
Job* table[Jobs];

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

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

  return 0;
}
```

`release` $O(1)$

`extract` $O(n)$, obere Schranke Jobs

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

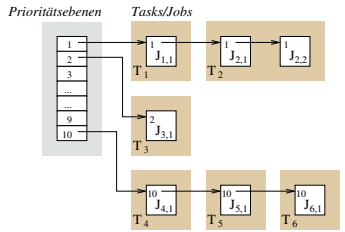
```
Job* table[Jobs];

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

Job* extract() {
  for(unsigned 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 Jobs pro Task
- Reihenfolge der Auslösung



Feste/Dynamische Prioritäten und Ablauftabellen/-listen

Welche Datenstrukturen bieten sich für die Umsetzung jeweils an?

Ablauftabellen haben eine statische Struktur

- Prioritäten werden fest auf Tabellenindizes abgebildet

⇝ das Prioritätsgefüge ist zur Laufzeit unveränderbar

- es werden absolute Prioritäten von Aufgaben verwaltet

⇝ Eignung für die Implementierung fester Prioritäten

Ablauflisten haben eine dynamische Struktur

- Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste

⇝ das Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an

- Prioritäten werden relativ zu anderen Arbeitsaufträgen verwaltet

⇝ Eignung für die Implementierung dynamischer Prioritäten

- auch andere dynamische, (partiell) sortierte Datenstrukturen sind hier denkbar, z.B. binäre Haufen (engl. *binary heap*)

Prioritätsorientierter $O(1)$-*Scheduler* !?

Die Tücke liegt oft im Detail...

Jobauslösung mit konstantem Aufwand, $O(1)$, ist möglich, sofern gilt:

1. der Ablaufplan ist eine auf mehrere Prioritätsebenen aufgeteilte dynamische Datenstruktur, repräsentiert als Tabelle von...
   - Wartelisten ⇝ LIFO
   - Warteschlangen ⇝ FIFO
2. alle Jobs, die über denselben Tabelleneintrag erfasst werden, besitzen auch dieselbe Priorität ⇝ Prioritätsschlange
   - sonst könnte LIFO/FIFO Prioritätsverletzung zur Folge haben
3. die Anzahl der Tabelleneinträge entspricht mindestens der Anzahl statisch zugewiesener Prioritäten
   - ggf. werden dann nahezu alle Tabelleneinträge nur einen Job erfassen
   - hängt ab von der Echtzeitanwendung und dem Einplanungsverfahren

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

- begrenzt viele leere Tabelleneinträge sind ggf. zu überspringen

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

Eine Abwägungsfrage...

Vorrangsteuerung ist mit einem grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:

- entweder Jobauslösung oder Jobauswahl mit $O(1)$ zu versehen
  - beides zugleich geht nicht

...für Jobauslösung in $O(1)$ spricht:

- ereignisgesteuerte Einplanung/Einlastung benötigen konstante Zeit
  - als Folge eines *Interrupts* oder der Zustellung eines „Zeitsignals“
  - bedeutsam für voll-verdrängbare (engl. *full preemptive*) Systeme
- ereignisbedingte Jobverzögerungen lassen sich exakt bestimmen

...für Jobauswahl in $O(1)$ spricht:

- der Übergang zum jew. nachfolgenden Job benötigt konstante Zeit
  - wenn z.B. der aktuelle Job durchgelaufen ist oder blockiert

☞ Linux 2.6, Mach, QNX, ..., VxWorks verhelfen Jobauslösung zu $O(1)$

Gliederung

1 Überblick
2 Periodische Aufgaben
- Zeitparameter periodischer Aufgaben
- Periodische Echtzeitanwendungen
- Restriktionen

3 Ereignisgesteuerte Ausführung
- Feste und dynamische Prioritäten
- Verdrängbarkeit
- Ereignisorientierter Planer
- Berechnungskomplexität

4 Zeitgesteuerte Ausführung
- Naive Implementierung
- Ablauftabellen
- Einlastung und Laufzeitkontrolle
- Stapelbasierte Ablaufplanung

5 Zusammenfassung

Die „*Busy Loop*“

Die wirklich einfachste Variante für die Implememtierung zyklischer Systeme?

Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

```
int main(void) {
  unsigned long cnt = 0;

  while(1) {
    warte_durchlauf();

    kontrolle_start();
    aufgabe1();
    kontrolle_stop();

    if(counter % 2 == 0) {
      aufgabe2_1();
    }

    10ms_nach_aufgabe1();

    if(counter % 2 == 0) {
      aufgabe2_2();
    }

    cnt++;
  }

  return 0;
}
```

- längere Perioden lassen sich durch einen Rundenzähler ableiten
  - die Schleife definiert einen Rahmen
  - $\rightsquigarrow$ ausrichtendes Raster für alle Aktivitäten
- Explizite Überwachung der Rahmendauer
  - Ausführungszeit ist i.d.R. nicht konstant
- Schwierige Spezifikation zeitlichen Versatzes
  - Abhängigkeit von der tats. Ausführungszeit
- Konflikte durch lange andauernde Jobs
  - evtl. ist eine manuelle Aufteilung nötig
- Überwachung der Ausführungszeit
  - schwieriger Abbruch des betroffenen Jobs

Arbeitsaufträge mit strikten Terminen

Alle Parameter der Arbeitsaufträge sind im Voraus bekannt

Vorabwissen bahnt den Weg, um Ablaufpläne *off-line* erstellen zu können

- alle Programme und das System verhalten sich deterministisch
  - oder noch besser $\rightsquigarrow$ vorhersagbar

statischer Ablaufplan $\mapsto$ exakter Jobfahrplan; enthält feste Angaben darüber, wann welche Arbeitsaufträge auszuführen sind

- die jedem Arbeitsauftrag zugeteilte Prozessorzeit ist gleich seiner maximalen Ausführungszeit $\rightsquigarrow$ WCET
- Einlastung der Arbeitsaufträge geschieht streng nach Fahrplan
  - alle Termine werden im Normalfall sicher eingehalten
  - unvorhergesehene Ausnahmen[2] führen zu Terminüberschreitungen
- da die Einplanung *off-line* geschieht, können Algorithmen mit hoher Berechnungskomplexität zum Einsatz kommen

[2] Gemeint sind hier die synchronen Programmunterbrechungen (d.h., *Traps*), z.B. aufgrund von Berechnungs- und/oder Adressierungsfehlern.

Abarbeitung statischer Ablaufpläne

Tabellengesteuerte Einlastung von Arbeitsaufträgen

Repräsentation vorberechneter (statischer) Ablaufpläne $\rightsquigarrow$ Tabelle

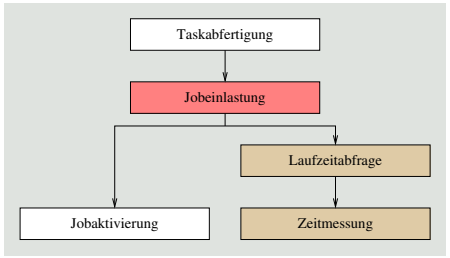
- jeder Tabelleneintrag entspricht einer Einplanungsentscheidung zu einem (vorab) bestimmten Zeitpunkt auf der Echtzeitachse
- bei Einlastung wird ein Zeitgeber (engl. *timer*) programmiert und der Arbeitsauftrag wird gestartet
  - „Kurzzeitwecker“ auf nächsten Entscheidungszeitpunkt stellen
  - einzustellender Wert ist im aktuellen Tabelleneintrag zu finden
- ein Zeitgebersignal schaltet zum nächsten Tabelleneintrag weiter

Reihumverfahren: am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen

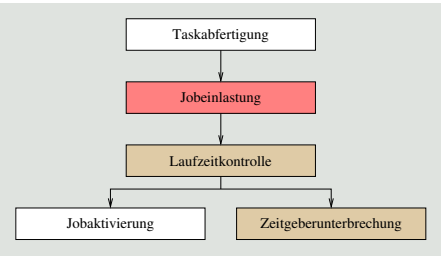
- zyklischer Ablaufplan (engl. *cyclic schedule*) periodischer Aufgaben

Abfertigung von Arbeitsaufträgen

Abfragebetrieb (engl. *polling mode*) vs. Unterbrecherbetrieb (engl. *interrupt mode*)



Abfragebetrieb
(S. IV-1/30 bis IV-1/31)



Unterbrecherbetrieb
(S. IV-1/32 bis IV-1/34)

Benutzthierarchie

Die Benutztbeziehung [3] in einer funktionalen Hierarchie drückt Abhängigkeiten von der Verfügbarkeit korrekter Implementierungen von Funktionen aus. *A* benutzt *B*, wenn die korrekte Ausführung von *B* zwingend ist für die Korrektheit von *A*: d.h., die Korrektheit von *A* hängt ab von der Korrektheit von *B* (*A* liegt über *B*).

Tabellengesteuerte Einlastung zyklischer Arbeitsaufträge

Taskabfertigung: Grundsätzliche Verfahrensweise

```
erledige Dispatcher (Ablauftabelle, Tabellenlänge):
  setze Laufzähler auf ersten Eintrag der Ablauftabelle;
  solange der Betrieb läuft tue
    erledige
      laste Ablauftabelle[Laufzähler].Arbeitsauftrag ein;
      wenn Laufzähler < Tabellenlänge dann erhöhe Laufzähler um 1
        sonst setze Laufzähler auf ersten Eintrag der Ablauftabelle;
    basta;
basta.
```

Einlastung der Arbeitsaufträge verläuft in drei grundsätzlichen Schritten:

1. Laufzeitüberwachung des anstehenden Arbeitsauftrags aufsetzen
2. anstehenden Arbeitsauftrag starten und ausführen
3. sich auf den nächsten Entscheidungszeitpunkt synchronisieren

Synchronisation durch Abfrage eines Taktzählers

Jobeinlastung, Laufzeitabfrage und Zeitmessung

```
erledige laste ein (Arbeitsauftrag):
  interpretiere Arbeitsauftrag.Entscheidungszeitpunkt als Taktzahl;
  aktiviere Arbeitsauftrag;
  solange Taktzähler < Taktzahl tue nichts;
basta.
```

Grundlage bildet ein Taktzähler (engl. *clock counter*) in der Hardware

- der Entscheidungszeitpunkt muss als Taktzahl vorliegen oder in eine Taktzahl umgerechnet werden können
  - diese Taktzahl wird nach Beendigung des Arbeitsauftrags abgewartet
- gezählt werden z.B. die CPU-Takte bei Befehlsausführung

☞ Verzögerung von Arbeitsaufträgen kann Spätfolgen nach sich ziehen

Abfragebetrieb im Rückblick

Verzögerungsproblematik bei Taktzähler und Zeitkontrolle

Abtastung des Zeitgebers durch das im Vordergrund laufende Programm

- nachdem ein aktivierter Arbeitsauftrag komplett durchgelaufen ist
  - Arbeitsaufträge erhalten einen gewissen Vertrauensvorschuss
  - evtl. Terminüberschreitungen werden erst im Nachhinein erkannt
- schwache/strikte Echtzeitfähigkeit liegt ganz in Anwendungshand
  - schwach bei Terminüberschreitung, Ergebnis findet Verwendung
    - der nachfolgende Arbeitsauftrag startet verspätet
    - als Folge kann das System komplett aus den Takt geraten
  - strikt sonst, d.h., wenn Termineinhaltung jederzeit garantiert ist
- die WCET muss die Behandlung evtl. Fehlersituationen einschließen

☞ Alternative: Zeitgeberunterbrechnung (engl. *timer interrupt*)

Synchronisation durch unterbrechenden Zeitgeber

Jobeinlastung: Einseitige Synchronisation mit Zeitgeberunterbrechung

```
erledige laste ein (Arbeitsauftrag):
  stelle Zeitgeber ein auf Arbeitsauftrag.Entscheidungszeitpunkt;
  kontrolliere Arbeitsauftrag;
  solange Zeitgebersignalmarke ungesetzt ist tue nichts;
  setze Zeitgebersignalmarke zurück;
basta.
```

Anzeige des Zeitgebersignals durch ein im Hintergrund arbeitendes Gerät

- Ausführungsfreigabe durch Softwaresignal der Behandlungsroutine
  - hier: die Zeitgebersignalmarke, die beim Konsumieren gelöscht wird
  - der *Dispatcher* synchronisiert sich mit dem Zeitgeber
- Abbruch des Arbeitsauftrags als Folge einer Zeitgeberunterbrechung
  - sofern der Arbeitsauftrag dann noch in Ausführung befindlich war
  - ist in Bezug auf die WCET des Arbeitsauftrags ein Ausnahmefall

Synchronisation durch unterbrechenden Zeitgeber (Forts.)

Laufzeitkontrolle, Zeitgeberunterbrechung: Bedingter Jobabbruch

erledige Behandlungsroutine zum *Timer Interrupt*:
  wenn Arbeitsauftrag.Zustand = laufend dann breche Arbeitsauftrag ab;
  setze Zeitgebersignalmarke;
basta.

Erfüllung der Wartebedingung für den (aktiv wartenden) *Dispatcher*

- ggf. Abbruch eines seinen Termin überschreitenden Arbeitsauftrags

erledige kontrolliere (Arbeitsauftrag):
  setze Arbeitsauftrag.Zustand auf laufend;
  aktiviere Arbeitsauftrag;
  setze Arbeitsauftrag.Zustand auf beendet;
basta.

„Schönheitsfehler“:

- Zustand
- Signalmarke
- unnötiger *Interrupt*

Synchronisation durch unterbrechende Zeitkontrolle

Jobeinlastung, Laufzeitkontrolle, Zeitgeberunterbrechung: Unbedingter Jobabbruch

erledige Behandlungsroutine zum *Timer Interrupt*:
  breche Arbeitsauftrag ab;
basta.

erledige kontrolliere (Arbeitsauftrag):
  lasse Unterbrechung durch Zeitkontrolle zu;
  aktiviere Arbeitsauftrag;
  wehre Unterbrechung durch Zeitkontrolle ab;
basta.

Ausnahmefall die Zeitkontrolle läuft bei Überschreitung der WCET des Arbeitsauftrags ab

erledige laste ein (Arbeitsauftrag):
  richte Zeitkontrolle aus auf Arbeitsauftrag.Entscheidungszeitpunkt;
  kontrolliere Arbeitsauftrag;
  solange Zeitkontrolle $\neq 0$ tue nichts;
basta.

Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen

Mischung aus lang andauernden und häufig wiederkehrenden Jobs unterstützen

Batch Processing führt einen Job nach dem anderen aus

- lang andauernde Jobs verzögern kurze, häufig wiederkehrende Jobs

$\rightsquigarrow$ diese Jobs verpassen u.U. deshalb ihre Termine

- oder lange andauernde Jobs werden in handliche „Happen“ zerteilt

Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen erlaubt Verdrängung

- der eingelastete Job verdrängt den aktuell ausgeführten Job
  - der ausgeführte Job wird nicht abgebrochen

$\rightsquigarrow$ mehrere *kurze* Jobs während eines *langen* Jobs ausführen

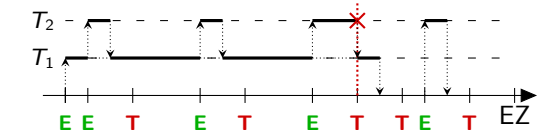
- die Kontrolle des ausgeführten Jobs wird schwieriger
  - ein Entscheidungszeitpunkt ermöglicht die Einlastung oder die Kontrolle eines Jobs, beides zugleich ist i.A. nicht möglich
  - die Ausführungszeit eines Jobs muss explizit protokolliert werden
  - alternativ wird eine Terminüberwachung statt einer Laufzeitkontrolle durchgeführt (z.B. OSEKtime [2])

Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen

Beispiel – $T_1 = (20, 10, 15, 0)$, $T_2 = (5, 1, 2, 1)$

mögliche Ablauftabelle:

Aktion	Aufgabe	Zeit
E	T_1	0
E	T_2	1
T	T_2	3
E	T_2	6
T	T_2	8
E	T_2	11
T	T_2	13
T	T_1	15
E	T_2	16
T	T_2	18



- t = 0 T_1 einlasten
- t = 1,6,11 T_2 einlasten, T_1 verdrängen
- t = 2,7 T_2 terminiert, T_1 fortsetzen
- t = 13 T_2 verfehlt seinen Termin
  $\rightsquigarrow$ Ausnahme auslösen, T_2 abbrechen
- t = 14 T_1 terminiert
- t = 16 T_2 einlasten
- t = 17 T_2 terminiert

Gliederung

1 Überblick
2 Periodische Aufgaben
- Zeitparameter periodischer Aufgaben
- Periodische Echtzeitanwendungen
- Restriktionen

3 Ereignisgesteuerte Ausführung
- Feste und dynamische Prioritäten
- Verdrängbarkeit
- Ereignisorientierter Planer
- Berechnungskomplexität

4 Zeitgesteuerte Ausführung
- Naive Implementierung
- Ablauftabellen
- Einlastung und Laufzeitkontrolle
- Stapelbasierte Ablaufplanung

5 Zusammenfassung

Resümee

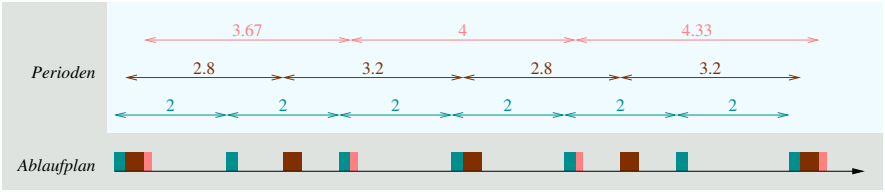
Periodische Aufgaben haben in Echtzeitsystemen eine weite Verbreitung
- Periode, Phase, Hyperperiode, digitale Kontrollschleife
- Restriktionen periodischer Aufgaben und ihre Einschränkungen

Ereignisgesteuerte Ausführung periodischer Aufgaben
- Ereignis- bzw. prioritätsorientierte Einplanung
- Feste und dynamische Prioritäten auf Task- bzw. Job-Ebene
- Auslösung vs. Auswahl, Ablaufliste vs. Ablauftabelle
- *Multi-Level-Queue-Scheduler*, Prioritätsorientierter $O(1)$-*Scheduler*

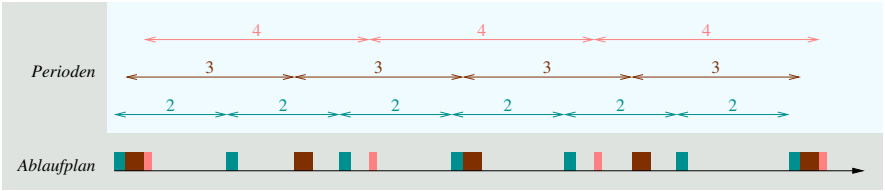
Zeitgesteuerte Ausführung periodischer Aufgaben
- naive „*Busy Loop*“-Implementierung und Ablauftabellen
- Laufzeitkontrolle im Abfrage- und Unterbrecherbetrieb
- stapelbasierte Ablaufplanung

Genauigkeit periodischer Aufgaben

Einfluss der Einplanung auf Schwankungen in der Einlastung



- bis auf Periode 2 sind alle anderen Jobs nicht wirklich periodisch



- alle Jobs laufen wirklich periodisch ab: Jobabstand = Periode

Literaturverzeichnis

[1] Liu, J. W. S.:
Real-Time Systems.
Prentice-Hall, Inc., 2000. –
ISBN 0–13–099651–3

[2] OSEK/VDX Group:
Time Triggered Operating System Specification 1.0 / OSEK/VDX Group.
2001. –
Forschungsbericht. –
http://portal.osek-vdx.org/files/pdf/specs/ttos10.pdf

[3] Parnas, D. L.:
Some Hypotheses About the “Uses” Hierarchy for Operating Systems / TH Darmstadt.
1975 (BS I 75/2). –
Forschungsbericht